



TUGAS AKHIR - MO141326

**STUDI ANALITIS, NUMERIS DAN EKPERIMEN OLAH
GERAK SERTA DINAMIKA TEGANGAN SISTEM
TAMBAT MODEL SPAR TIPE KLASIK DALAM KONDISI
FREE FLOATING DAN TERTAMBAT DENGAN VARIASI
KONFIGURASI TALI (TAUT, CATENARY 1 DAN
CATENARY 2)**

IRZA YANUAR ISHAQ

NRP. 4313 100 032

Dosen Pembimbing :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Ir. Murdjito, M.Sc.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 60111

2017



FINAL PROJECT - MO141326

**ANALYTICAL, NUMERICAL AND EXPERIMENTAL
STUDY OF MOTION AND DYNAMIC MOORING
SYSTEM TENSION CLASSICAL SPAR MODEL IN
FREE FLOATING AND MOORED CONDITION WITH
VARIATION MOORING LINE CONFIGURATION**

IRZA YANUAR ISHAQ
NRP. 4313 100 032

Supervisors :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Ir. Murdjito, M.Sc.Eng.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Marine Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 60111
2017

**STUDI ANALITIS, NUMERIS DAN EKSPERIMEN OLAH GERAK
SERTA DINAMIKA TEGANGAN SISTEM TAMBAT MODEL SPAR
TIPE KLASIK DALAM KONDISI *FREE FLOATING* DAN TERTAMBAT
DENGAN VARIASI KONFIGURASI TALI (*TAUT*, *CATENARY 1* DAN
CATENARY 2)**

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

IRZA YANUAR ISHAQ

NRP. 4313 100 032

Disetujui oleh :

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 1)
2. Ir. Murdjito, M.Sc,Eng. (Pembimbing 2)
3. Ir. Mas Murtedjo, M.Eng. (Penguji)
4. Agro Wisudawan, ST.,MT. (Penguji)

SURABAYA, JULI 2017

**STUDI ANALITIS, NUMERIS DAN EKSPERIMEN OLAH GERAK SERTA DINAMIKA
TEGANGAN SISTEM TAMBAT MODEL SPAR TIPE KLASIK DALAM KONDISI *FREE
FLOATING* DAN TERTAMBAT DENGAN VARIASI KONFIGURASI TALI (*TAUT*,
CATENARY 1 DAN *CATENARY 2*)**

Nama : Irza Yanuar Ishaq
NRP : 4313 100 032
Departemen : Teknik Kelautan FTK – ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, MSc., Ph.D.
Ir. Murdjito, MSc.Eng

Abstrak

Floating structure telah digunakan secara luas untuk kegiatan eksplorasi dan produksi minyak dan gas di laut dalam. *Floating structure* jenis SPAR menjadi alternatif untuk penyimpanan minyak dan gas di laut dalam. SPAR terdiri dari silinder vertikal yang menyediakan *buoyancy* untuk mendukung fasilitas yang berada di atas permukaan air. SPAR tertambat menggunakan sistem tambat konvensional atau *taut catenary mooring lines* saat beroperasi di laut lepas. Dalam penelitian ini, dilakukan analisa secara analitis, numerik dan eksperimen model SPAR (skala 1:125) di laboratorium Hidrodinamika ITS dalam kondisi *free floating* dan tertambat dengan variasi konfigurasi tali tambat (*taut*, *catenary 1*, dan *catenary 2*) untuk mengetahui karakteristik gerakan SPAR (*surge*, *heave*, *pitch*) dan tegangan tali maksimum yang terjadi dalam bentuk RAO gerak dan RAO *tension*. Dari hasil penelitian didapatkan untuk kondisi *free floating* dan tertambat, RAO gerakan model mengalami perubahan yang signifikan. Sedangkan, untuk variasi konfigurasi tali tambat RAO gerak saat model menggunakan *taut mooring* lebih kecil dibandingkan dengan *catenary mooring*. Jadi, pengaruh dari tipe *mooring line* signifikan untuk RAO gerak. Untuk RAO *tension* tali tambat, *tension* tali yang terjadi pada *catenary mooring* lebih besar dibandingkan *taut mooring* karena *offset* yang terjadi lebih besar dan berat dari tali bertambah.

Keywords : SPAR, konfigurasi tali, *taut*, *catenary*, eksperimen, analitis, numeris

**ANALYTICAL, NUMERICAL, AND EXPERIMENTAL STUDY OF MOTION AND
DYNAMIC MOORING SYSTEM TENSION CLASSICAL SPAR MODEL IN FREE
FLOATING AND MOORED CONDITION WITH VARIATION MOORING LINE
CONFIGURATION**

Name : Irza Yanuar Ishaq
Reg. Number : 4313 100 032
Department : Ocean Engineering, FTK – ITS
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, MSc., Ph.D.
Ir. Murdjito, MSc.Eng

Abstract

Floating structure has been used widely for the exploration and production oil and gas in deepsea. SPAR (Single Point Anchor Reservoir) is floating structure that used for store oil and gas in deepsea. SPAR is consist of vertical cylinder that provide buoyancy to support the facilities above the surface of water. To keep its position when operates, SPAR uses conventional mooring system or taut catenary mooring lines. In this research, experiment SPAR model using froud scale 1:125 in free floating and moored condition with variation of mooring system configuration (taut, catenary 1, and catenary 2) is carried out in Hydrodynamics Laboratory ITS. The purpose of this research is to know the characteristic behavior of SPAR motion (surge, heave, pitch) and maximum mooring line tension in dynamic function presented using RAO motion and RAO tension. The result of experiment will be compared with the analytical and numerical result using MOSES EDITOR.

From the result of this research concluded that for the free floating and moored condition, RAO motion of the model changes significantly. Then, for the variation of mooring system configuration concluded that RAO motion when the model using taut mooring is less than using catenary mooring. So, the effect of mooring line type is significant for RAO motion. For the RAO tension mooring line, the tension line that occur in catenary mooring is more than taut mooring because the offset when using catenary mooring is high and the increasing weight of the mooring line made the tension is more higher than taut mooring.

.Keywords : SPAR, mooring system, taut, catenary, experiment, analytic, numeric

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT karena berkat limpahan rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan sebaik-baiknya. Sholawat serta salam juga penulis haturkan kepada junjungan seluruh umat manusia Rasulullah Muhammad SAW.

Tugas Akhir ini berjudul “*Studi Analitis, Numeris dan Eksperimen Olah Gerak serta Dinamika Tegangan Sistem Tambat Model SPAR Tipe Klasik dalam Kondisi Free Floating dan Tertambat dengan Variasi Konfigurasi Tali (Taut, Catenary 1, dan Catenary 2)*”. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S-1) di Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Tugas Akhir ini secara khusus akan membahas mengenai olah gerak dari struktur SPAR yang dianalisa secara analitis, numeris dan juga eksperimen dengan membuat model SPAR dan diuji di Laboratorium Hidrodinamika ITS dalam kondisi terapung bebas dan tertambat selain itu tegangan tali tambat yang terjadi juga dianalisa. Adanya Tugas Akhir ini diharapkan dapat menambah wawasan pembaca mengenai analisa olah gerak model SPAR dalam kondisi terapung bebas dan tertambat secara analitis, numeris maupun eksperimen.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan dan penulisan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran guna meningkatkan kemampuan menyusun laporan yang lebih baik lagi ke depannya. Penulis juga berharap semoga Tugas Akhir ini bisa bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan penulis pada khususnya.

Surabaya, 2017

Irza Yanuar Ishaq

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini Saya menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu pelaksanaan Tugas Akhir dan juga dalam penulisan laporan ini, meliputi :

1. Bapak Prof. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing 1 yang telah banyak memberikan ilmu dan menginspirasi selama kuliah di Teknik Kelautan.
2. Bapak Ir. Murdjito, M.Sc selaku dosen pembimbing 2 yang telah banyak memberikan ilmu dan saran selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Mbak Irma dan keluarga yang selalu memberikan doa dan dukungan dalam menjalani hidup ini.
4. Teman-teman seperjuangan tugas akhir eksperimen SPAR yaitu Ivandito, Salman, Naufal dan Arif yang telah bersabar dan berusaha keras selama mengerjakan tugas akhir ini. Banyak sekali kenangan yang tidak akan terlupakan dari awal pengerjaan hingga laporan tugas akhir ini selesai dibuat, *wish you all the best guys*.
5. Bapak Condro dan Mas Rudi selaku teknisi Laboratorium Hidrodinamika ITS yang telah banyak sekali memberikan bantuan dan nasehat selama melaksanakan eksperimen tugas akhir ini.
6. Bapak Drs. Mahmud Mustain, M.Sc., Ph.D. selaku dosen wali yang tidak pernah lupa memberikan nasehat untuk selalu beribadah kepada Allah.
7. Neneng Roswati yang selalu sabar menemani dan memberikan semangat selama mengerjakan tugas akhir.
8. Teman-teman pengurus Lab Hidrodinamika ITS dan Valtameri yang selalu memberikan motivasi selama mengerjakan tugas akhir ini.

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK INDONESIA	v
ABSTRAK INGGRIS	vii
KATA PENGANTAR	ix
UCAPAN TERIMA KASIH.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxv
DAFTAR LAMPIRAN	
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	4
1.3 TUJUAN PENELITIAN	4
1.4 MANFAAT	4
1.5 BATASAN MASALAH.....	5
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.2 DASAR TEORI.....	10
2.2.1 Gerak Bangunan Apung	10
2.2.2 Teori Gelombang Airy	11
2.2.3 Beban Hidrodinamika	12
2.2.4 Persamaan Gerak.....	18
2.2.5 Response Amplitude Operator (RAO)	20
2.2.6 Sistem Tambat (Mooring System)	23
2.2.7 Teori Permodelan	25

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	DIAGRAM ALIR	29
3.2	PENJELASAN DIAGRAM ALIR	32
3.2.1	Studi Literatur dan Pengumpulan Data	32
3.2.2	Permodelan Kondisi	34
3.2.3	Permodelan Eksperimen dan Numerik.....	34
3.2.4	Parameter Hidrostatik.....	35
3.2.5	Rancang Model	35
3.2.6	Kalibrasi Model.....	36
3.2.7	Rancang Sistem Tertambat	37
3.2.8	Parameter Sistem Tertambat	39
3.2.9	Instrumen Laboratorium.....	40
3.2.10	Metode Analitis	43
3.2.11	Metode Numerik	44
3.2.12	Metode Eksperimen	46
3.3	TIMELINE.....	50

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1	PEMODELAN STRUKTUR.....	51
4.1.1	Pemodelan Numerik.....	51
4.1.2	Pemodelan Eksperimen.....	53
4.2	PEMODELAN TALI TAMBAT	61
4.3	VALIDASI MODEL.....	64
4.3.1	Validasi Model Numerik.....	64
4.3.2	Validasi Model Eksperimen	65
4.4	INSTRUMEN PENGUKURAN	70
4.4.1	Kalibrasi Gyroscope.....	70
4.4.2	Kalibrasi Image Processing.....	75
4.4.3	Kalibrasi Load Cell	79

4.5	RAO TERAPUNG BEBAS	87
4.5.1	Metode Analitis	87
4.5.2	Metode Numeris	93
4.5.3	Metode Eksperimen.....	95
4.5.4	Perbandingan RAO Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen..	102
4.6	RAO TERTAMBAT	104
4.6.1	Kekakuan Tali Tambat	104
4.6.2	Metode Analitis	109
4.6.3	Metode Numeris	111
4.6.4	Metode Eksperimen.....	118
4.6.5	Perbandingan RAO Tertambat Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen.....	122
4.7	TEGANGAN TALI.....	125
4.7.1	Metode Numeris	126
4.7.2	Metode Eksperimen.....	128
4.7.3	Perbandingan RAO Tension Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen.....	134
4.8	VARIASI KONFIGURASI TALI	138
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	148
5.2	Saran	151
DAFTAR PUSTAKA		

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Perkembangan SPAR platform (Technip,2017).....	2
Gambar 1.2	Rencana eksperimen SPAR dengan variasi konfigurasi tali awal (<i>taut</i> , <i>catenary</i> 1 dan <i>catenary</i> 2)	3
Gambar 2.1	SPAR platform dengan <i>mooring system</i> yang digunakan (offshore- mag, 2016)	7
Gambar 2.2	6 Mode Gerakan Bangunan Apung (Journee & Massie, 2001)	11
Gambar 2.3	Beban hidrodinamika pada struktur (Faltinsen, 1990)	13
Gambar 2.4	Persamaan <i>added mass</i> untuk beberapa bentuk benda (Sarpkaya,2010)	16
Gambar 2.5	Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung (Djarmiko, 2012)	22
Gambar 2.6	Sistem tambat tipe <i>catenary</i> (abc-moorings,2010).....	24
Gambar 2.7	sistem tambat tipe <i>taut</i> (Engineering,2006).....	24
Gambar 3.1	Diagram alir tugas akhir	31
Gambar 3.2	Desain pemberat dan ulir.....	36
Gambar 3.3	Rencana sistem tambat yang digunakan pada pengujian model SPAR	38
Gambar 3.4	Jangkar dan Load Cell	38
Gambar 3.5	Model SPAR dengan sistem tambat	39
Gambar 3.6	Diagram Sistem Accelero-gyro	41
Gambar 3.7	Diagram Sistem Load Cell yang digunakan pada eksperimen	42
Gambar 3.8	Kamera dan benda yang ditracking	43

Gambar 3.9	Konfigurasi tali penahan gerak <i>drifting</i>	47
Gambar 3.10	Konfigurasi eksperimen model SPAR tertambat.....	48
Gambar 3.11	Setup model dengan variasi konfigurasi tali (<i>taut</i> , <i>catenary</i> 1 dan <i>catenary</i> 2)	49
Gambar 4.1	Tampak isometri model	52
Gambar 4.2	Tampak isometri model dengan meshing	52
Gambar 4.3	Tampak atas model dengan meshing	52
Gambar 4.4	Tampak depan model dengan meshing.....	53
Gambar 4.5	(a). Tampak depan model, (b). Tampak deck dan (c). Fairlead model	55
Gambar 4.6	Pemberat dan ulir di dalam lambung	55
Gambar 4.7	Desain pemberat dan ulir	57
Gambar 4.8	Katalog <i>property wire rope</i>	62
Gambar 4.9	Bahan tali tambat	63
Gambar 4.10	Set up kondisi 1 pendulum test untuk perhitungan jari-jari girasi.....	66
Gambar 4.11	Pendulum test kondisi 1	66
Gambar 4.12	Set-up kondisi 2 pendulum test untuk perhitungan jari-jari girasi.....	67
Gambar 4.13	Pendulum test kondisi 2	67
Gambar 4.14	Instrumen giroskop	71
Gambar 4.15	Deck dan busur	71
Gambar 4.16	<i>Gyroscope</i> pada geladak model fisik.	72
Gambar 4.17	Keluaran Arduino pada sudut 0° searah jarum jam.....	72

Gambar 4.18	Giroskop dan deck saat proses kalibrasi.....	73
Gambar 4.19	Keluaran Arduino dengan sudut yang dibentuk	74
Gambar 4.20	Sketsa model dalam Image Processing.....	76
Gambar 4.21	Kamera dan benda yang ditracking	76
Gambar 4.22	Konfigurasi geladak dengan objek yang ditinjau.	76
Gambar 4.23	Webcam Logitech c270 dengan menggunakan lensa <i>fix focus</i>	77
Gambar 4.24	Model SPAR dengan bola merah yang digunakan dalam analisa gerak model menggunakan <i>image</i> <i>processing</i>	78
gambar 4.25	<i>Background image</i> yang digunakan sebagai gambar acuan.....	78
Gambar 4.26	Output datalog dari data frame yang dihasilkan.....	79
Gambar 4.27	Output grafik dari data frame yang dihasilkan untuk gerakan heave dan surge.....	79
Gambar 4.28	Konfigurasi Load Cell (A), HX711 (B) dan Arduino UNO (C)	80
Gambar 4.29	Instrumen <i>Load Cell</i> dan arah beban.....	80
Gambar 4.30	Keempat Load Cell yang digunakan	81
Gambar 4.31	Beban Kalibrasi 1000 g (A), 500 g (B), 200 g (C), 100 g (D) dan 50 g (E).....	82
Gambar 4.32	Grafik kalibrasi Load Cell 1	83
Gambar 4.33	Grafik kalibrasi Load Cell 2	84

Gambar 4.34	Grafik kalibrasi Load Cell 3	85
Gambar 4.35	Grafik kalibrasi Load Cell 4	86
Gambar 4.36	Grafik RAO surge analitis	89
Gambar 4.37	Grafik RAO heave analitis	91
Gambar 4.38	Grafik RAO pitch analitis	93
Gambar 4.39	Grafik RAO surge numerik.....	94
Gambar 4.40	Grafik RAO heave numeris	94
Gambar 4.41	Grafik RAO pitch numeris	95
Gambar 4.42	Konfigurasi tali penahan drift	95
Gambar 4.43	Model SPAR kondisi <i>free floating</i>	96
Gambar 4.44	Lampu untuk penerangan.....	96
Gambar 4.45	Kode eksperimen	97
Gambar 4.46	Time History instrumen image processing untuk gerakan surge	98
Gambar 4.47	Time History instrumen image processing untuk gerakan heave.....	98
Gambar 4.48	Time History instrumen gyroscope untuk gerakan pitch	98
Gambar 4.49	Grafik RAO surge hasil eksperimen	100
Gambar 4.50	Grafik RAO heave hasil eksperimen	101
Gambar 4.51	Grafik RAO pitch hasil eksperimen.....	102
Gambar 4.52	Perbandingan RAO surge secara analitis, numeris dan Eksperimen	102

Gambar 4.53	Perbandingan RAO heave secara analitis, numeris dan Eksperimen	103
Gambar 4.54	Perbandingan RAO pitch secara analitis, numeris dan Eksperimen	103
Gambar 4.55	Konfigurasi SPAR	105
Gambar 4.56	Parameter geometris tali tambat. (Al-Solihat dan Nahon, 2015)	106
Gambar 4.57	Titik bayangan	108
Gambar 4.58	RAO <i>Surge</i> tertambat metode analitis	110
Gambar 4.59	RAO heave tertambat metode analitis	110
Gambar 4.60	RAO Pitch tertambat metode analitis	111
Gambar 4.61	Kondisi tertambat dalam MOSES	112
Gambar 4.62	RAO <i>surge</i> tertambat metode numerik.....	112
Gambar 4.63	RAO heave tertambat metode numerik	113
Gambar 4.64	RAO pitch tertambat metode numerik	114
Gambar 4.65	Konfigurasi eksperimen model SPAR tertambat	114
Gambar 4.66	Eksperimen SPAR Tertambat.....	115
Gambar 4.67	Time history instrumen image processing untuk gerakan heave tertambat	116
Gambar 4.68	Time history instrumen image processing untuk gerakan surge tertambat.....	117
Gambar 4.69	Time History instrumen giroskop untuk gerakan pitch tertambat	117

Gambar 4.70	Grafik RAO surge tertambat eksperimen	119
Gambar 4.71	Grafik RAO heave tertambat eksperimen.....	120
Gambar 4.72	Grafik RAO pitch tertambat eksperimen	122
Gambar 4.73	Perbandingan RAO surge tertambat metode analitis, metode numeris dan eksperimen.....	122
Gambar 4.74	Perbandingan RAO heave tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen	123
Gambar 4.75	Perbandingan RAO pitch tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen	124
Gambar 4.76	Posisi Line I, II, III dan IV	125
Gambar 4.77	Kondisi <i>Load Cell</i> dalam air	126
Gambar 4.78	Permodelan tali tambat dengan menggunakan MOSES EDITOR.....	127
Gambar 4.79	RAO Tension tali tambat I dan IV metode numerik.....	127
Gambar 4.80	RAO Tension tali tambat II dan III metode numerik.....	128
Gambar 4.81	Time History instrumen load cell tali tambat 1	129
Gambar 4.82	Time History instrumen load cell tali tambat 3	129
Gambar 4.83	Time History instrumen load cell tali tambat 4	130
Gambar 4.84	Grafik RAO tension tali tambat load cell 1 hasil Eksperimen	131
Gambar 4.85	Grafik RAO tension tali tambat load cell 3 hasil Eksperimen	132

Gambar 4.86	Grafik RAO tension tali tambat load cell 4 hasil	
	Eksperimen	134
Gambar 4.87	Perbandingan RAO Tension line I tertambat metode	
	numeris dan eksperimen	134
Gambar 4.88	Perbandingan RAO Tension line II tertambat metode	
	numeris dan eksperimen	135
Gambar 4.89	Perbandingan RAO Tension line III tertambat metode	
	numeris dan eksperimen	136
Gambar 4.90	Perbandingan RAO Tension line IV tertambat metode	
	numeris dan eksperimen	137
Gambar 4.91	Variasi konfigurasi tali yang dilakukan pada sistem tambat model	
SPAR	139
Gambar 4.92	Pemodelan konfigurasi tali sistem tambat tipe taut model SPAR pada	
	MOSES EDITOR	139
Gambar 4.93	Pemodelan konfigurasi tali sistem tambat tipe <i>catenary</i> 1 model	
	SPAR pada MOSES EDITOR.....	140
Gambar 4.94	Pemodelan konfigurasi tali sistem tambat tipe <i>catenary</i> 2 model	
	SPAR pada MOSES EDITOR.....	140
Gambar 4.95	Perbandingan hasil RAO gerak <i>surge</i> model SPAR kondisi	
	tertambat dengan variasi konfigurasi tali secara numeris	
	menggunakan MOSES EDITOR.....	141
Gambar 4.96	Perbandingan hasil RAO gerak <i>heave</i> model SPAR kondisi	
	tertambat dengan variasi konfigurasi tali secara numeris	
	menggunakan MOSES EDITOR.....	142

Gambar 4.97 Perbandingan hasil RAO gerak <i>pitch</i> model SPAR kondisi tertambat dengan variasi konfigurasi tali secara numeris menggunakan MOSES EDITOR.....	143
Gambar 4.98 Perbandingan hasil RAO tension Line 1 model SPAR dengan variasi konfigurasi tali secara numeris menggunakan MOSES EDITOR	144
Gambar 4.99 Perbandingan hasil RAO tension Line 3 model SPAR dengan variasi konfigurasi tali secara numeris menggunakan MOSES EDITOR	145
Gambar 4.100 Perbandingan hasil RAO tension Line 4 model SPAR dengan variasi konfigurasi tali secara numeris menggunakan MOSES EDITOR	146

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1a. <i>Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling</i>	27
Tabel 2.1b. <i>Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling lanjutan</i>	28
Tabel 3.1a. Data Mini SPAR (Deep Oil Technology Inc, 1995)	32
Tabel 3.1b. Data Mini SPAR (Deep Oil Technology Inc, 1995).....	33
Tabel 3.2. Data <i>Towing Tank</i> Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS	33
Tabel 3.3. Data Lingkungan.....	34
Tabel 3.4. <i>Properties</i> tali tambat dari <i>prototype</i> SPAR	40
Tabel 3.5. Periode gelombang yang digunakan dalam eksperimen	47
Tabel 3.6. Timeline pengerjaan tugas akhir	50
Tabel 4.1. Data dimensi struktur SPAR.....	51
Tabel 4.2. Distribusi massa SPAR	53
Tabel 4.3. Hasil penskalaan model SPAR sesuai dengan hukum Froude.....	54
Tabel 4.4. Hasil pengukuran berat material	56
Tabel 4.5. Perhitungan momen inersia massa pipa PVC	57
Tabel 4.6. Perhitungan momen inersia massa Blok A	58
Tabel 4.7. Perhitungan momen inersia massa Blok B	58
Tabel 4.8. Perhitungan momen inersia massa <i>topside</i>	59
Tabel 4.9. Perhitungan momen inersia massa Ulir	59
Tabel 4.10. Posisi pusat massa dari setiap material yang dipakai.....	60
Tabel 4.11. Pusat massa model	60
Tabel 4.12. Jari-jari girasi model	60
Tabel 4.13. Perbandingan distribusi massa hasil skala dengan hasil perhitungan	61
Tabel 4.14. Properti <i>mooring line wire rope</i>	61
Tabel 4.15. Spesifikasi talit tambat eksperimen.....	62
Tabel 4.16. Spesifikasi <i>mooring line</i> pada model <i>prototype</i>	63

Tabel 4.17. Perbandingan kekakuan model asli dengan data kekakuan <i>wire rope</i> acuan	63
Tabel 4.18. Data <i>properties mooring</i> yang digunakan pada model SPAR.....	64
Tabel 4.19. Perbandingan dan validasi model numerik dengan data	64
Tabel 4.20. Ukuran-ukuran yang digunakan pada <i>pendulum test</i>	68
Tabel 4.21. Periode dan frekuensi gerak pendulum model SPAR kondisi 1 dan 2	68
Tabel 4.22. Validasi model SPAR.....	70
Tabel 4.23. Kalibrasi searah jarum jam	73
Tabel 4.24. Kalibrasi berlawanan jarum jam.....	73
Tabel 4.25. Persamaan <i>trendline</i> arduino	74
Tabel 4.26. Data kalibrasi load cell 1 percobaan 1 dan 2	82
Tabel 4.27. Data kalibrasi load cell 2 percobaan 1 dan 2	83
Tabel 4.28. Data kalibrasi load cell 3 percobaan 1 dan 2	84
Tabel 4.29. Data kalibrasi load cell 4 percobaan 1 dan 2	85
Tabel 4.30. Persamaan kalibrasi keluaran load cell dengan beban	86
Tabel 4.31. Perbandingan <i>displacement</i> dari hasil data, analitis, dan numerik	87
Tabel 4.32. Parameter perhitungan RAO <i>surge</i>	88
Tabel 4.33. Parameter perhitungan RAO <i>heave</i>	90
Tabel 4.34. Parameter perhitungan RAO <i>pitch</i>	92
Tabel 4.35. Periode lingkungan dan periode eksperimen.....	97
Tabel 4.36. Respon gerak dan RAO gerakan <i>surge</i> hasil eksperimen	99
Tabel 4.37. Respon gerak dan RAO gerakan <i>heave</i> hasil eksperimen	100
Tabel 4.38. Respon gerak dan RAO gerakan <i>pitch</i> hasil eksperimen	101
Tabel 4.39. Perhitungan <i>pretension</i> dan panjang akibat pretension	104
Tabel 4.40. Sudut sebar <i>line</i>	105
Tabel 4.41. Kekakuan <i>surge</i>	106
Tabel 4.42. Konfigurasi sudut tanah- <i>line</i>	106
Tabel 4.43. Kekakuan karakteristik	107

Tabel 4.44. Kekakuan mode gerak <i>heave</i>	110
Tabel 4.45. Kekakuan mode gerak <i>pitch</i>	111
Tabel 4.46. Periode lingkungan dan periode eksperimen model tertambat yang digunakan	118
Tabel 4.47. Respon gerak dan RAO gerakan <i>surge</i> hasil eksperimen model tertambat.....	120
Tabel 4.48. Respon gerak dan RAO gerakan <i>heave</i> hasil eksperimen model tertambat.....	122
Tabel 4.49. Respon gerak dan RAO gerakan <i>pitch</i> hasil eksperimen.....	123
Tabel 4.50. Perbandingan RAO <i>surge</i> tertambat	125
Tabel 4.51. Perbandingan RAO <i>heave</i> tertambat.....	126
Tabel 4.52. Perbandingan RAO <i>pitch</i> tertambat	126
Tabel 4.53. <i>Tension Force</i> maksimum tiap tali tambat pada MOSES.....	129
Tabel 4.54. Data load cell 1 hasil eksperimen	132
Tabel 4.55. Data load cell 3 hasil eksperimen	134
Tabel 4.56. Data load cell 4 hasil eksperimen	135
Tabel 4.57. Perbandingan <i>tension line I</i>	137
Tabel 4.58. Perbandingan <i>tension line II</i>	137
Tabel 4.59. Perbandingan <i>tension line III</i>	138
Tabel 4.60. Perbandingan <i>tension line IV</i>	139
Tabel 4.61 Properties variasi konfigurasi tali	140
Tabel 4.62 Perbandingan RAO tertambat gerak <i>surge</i> maksimum tiap variasi konfigurasi tali	143
Tabel 4.63 Perbandingan RAO tertambat gerak <i>heave</i> maksimum tiap variasi konfigurasi tali	144
Tabel 4.64 Perbandingan RAO tertambat gerak <i>pitch</i> maksimum tiap variasi konfigurasi tali	145
Tabel 4.65 Perbandingan RAO <i>tension line 1</i> maksimum tiap variasi konfigurasi tali	146

Tabel 4.66 Perbandingan RAO tension line 3 maksimum tiap variasi konfigurasi tali	147
Tabel 4.67 Perbandingan RAO tension line 4 maksimum tiap variasi konfigurasi tali	148

BAB I

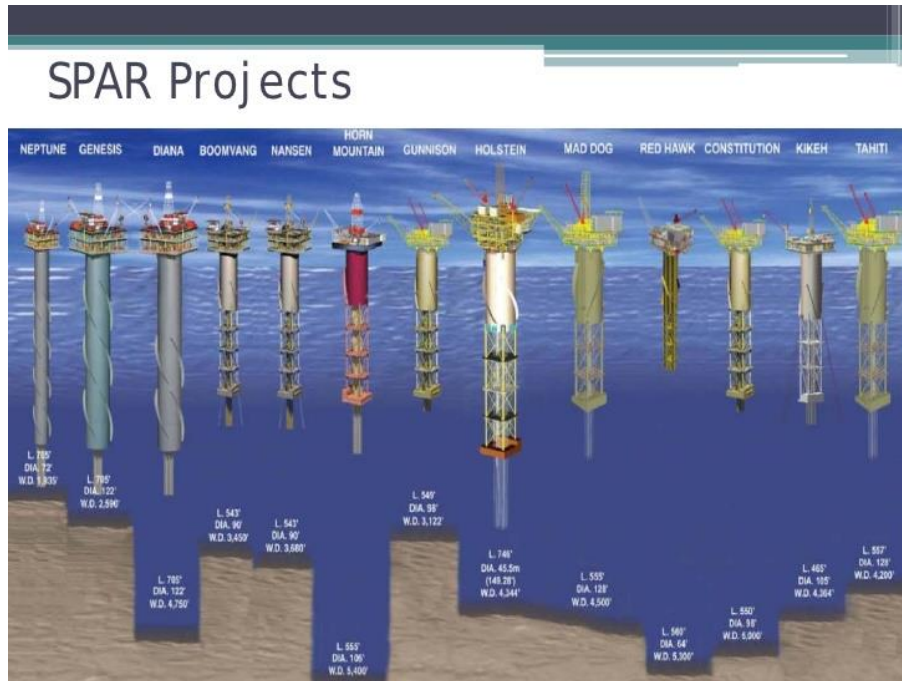
PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Industri lepas pantai membutuhkan perkembangan teknologi baru yang terus berlanjut untuk menghasilkan hidrokarbon di suatu lokasi yang tidak dapat diakses untuk dieksploitasi dengan teknologi yang ada sekarang. Dengan semakin tingginya kebutuhan minyak dan gas dunia, *floating structure* telah digunakan secara luas untuk produksi minyak dan gas di laut dalam (Li,2012). Respon gerakan dari *floating structure* khususnya respon *heave* sangatlah penting untuk pemilihan peralatan produksi dan pengeboran yang sesuai (Sudhakar et al,2011). *Floating structure* jenis SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*) menjadi alternatif untuk penyimpanan minyak dan gas di laut dalam. SPAR terdiri dari silinder vertikal yang menyediakan *buoyancy* untuk mendukung fasilitas yang berada di atas permukaan air (Deep Oil Technology Inc,1995). Saat ini, SPAR juga digunakan untuk *offshore wind farm* yang juga beroperasi di laut dalam (Sinpyo et al,2013).

Awalnya, SPAR digunakan sebagai *marker bouy* dan untuk mengumpulkan data oseanografi. Pada pertengahan tahun 1970 an, SPAR pertama dibangun yang digunakan untuk penyimpanan minyak dengan kapasitas 300.000 *barrels* dan kegiatan *offloading* di Brent Field, North Sea. Kemudian pada tahun 1996, SPAR untuk kegiatan produksi hidrokarbon pertama dibangun oleh Oryx Energy dan CNG dengan laju produksi 35 mbod untuk minyak dan 30 mmcf/d untuk gas (Chakrabarti,2005). *Classic* SPAR merupakan generasi pertama dari bangunan SPAR yang memiliki gerakan *heave* yang kecil dan gaya gelombang vertikal yang bekerja juga kecil karena *draft* nya yang besar (Liu et al,2003). Untuk generasi kedua, bagian tengah dari lambung SPAR digantikan dengan struktur *truss* yang ditambahkan dengan plat horizontal untuk mengurangi berat struktur, biaya, dan juga untuk mengurangi gaya *drag* akibat arus serta untuk mengurangi gerak *heave* yang terjadi (Mansouri et al,2009). Generasi ketiga dari SPAR merupakan “*cell*” SPAR yang proses konstruksinya berbeda dengan jenis SPAR sebelumnya. *Hull*

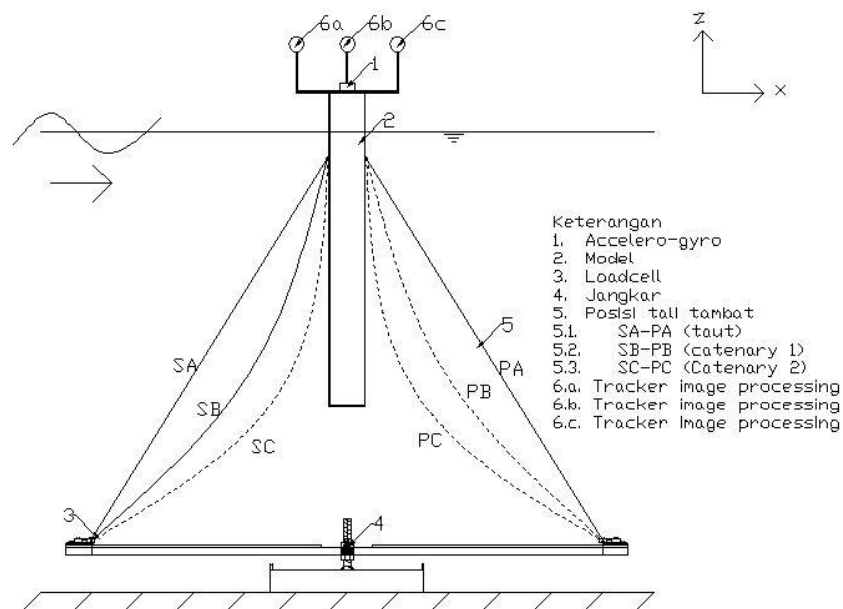
terdiri dari banyak *ring-stiffened tubes* atau “*cells*” yang disambung oleh plat horizontal dan vertikal. Metode konstruksi *cell* SPAR ini lebih murah dan lebih mudah prosesnya dibanding jenis sebelumnya (Lim et al, 2005).



Gambar 1.1. Perkembangan SPAR platform (Technip, 2017)

SPAR bersama dengan TLP, merupakan bangunan apung yang telah digunakan untuk *dry trees* alasannya adalah karena SPAR dan juga TLP merupakan struktur dengan gerakan *heave* dan *pitch* yang kecil sehingga riser dapat aman dan ekonomis yang didukung oleh *floater* (Wang, 2012). Kestabilan dari SPAR berasal dari titik pusat berat (*center of gravity*) struktur yang berada di bawah titik pusat *buoyancy* (*center of buoyancy*). SPAR memiliki *waterplane area* yang kecil sehingga mengurangi efek dari gaya gelombang yang terjadi dan cocok untuk beroperasi di *rough seas* (Sinpyo et al, 2015). Saat beroperasi di laut lepas, SPAR dikenai beban-beban lingkungan antara lain beban angin, gelombang dan arus yang bersifat dinamis yang mempengaruhi respon gerak bangunan SPAR untuk tetap berada pada posisinya ketika beroperasi. Untuk mengatasi masalah tersebut, SPAR bertambat dengan menggunakan sistem tambat konvensional atau *taut catenary mooring lines* (Glanville et al. 1991)

Sejak *classic* SPAR pertama dioperasikan di Gulf of Mexico pada tahun 1996, studi secara luas mengenai gerakan SPAR telah banyak dilakukan. *Joint Industry Project* melibatkan dua model SPAR *Platform* yang dianalisa (Consortium SPAR dan Mini-SPAR) di *Offshore Technology Research Center* (OTRC) Texas A&M University. Pada tugas akhir ini, dilakukan studi eksperimen model Mini-SPAR dari penelitian *Joint Industry Project* (JIP) menggunakan 4 buah *mooring line* yang diuji di laboratorium hidrodinamika ITS dengan menggunakan ratio skala *fraude* 1:125. Variasi konfigurasi tali *mooring line* yang digunakan yaitu dari *taut mooring*, *catenary mooring 1* dan *catenary mooring 2* yang dikenai beban gelombang reguler. Eksperimen dari variasi konfigurasi tali *mooring line* ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh konfigurasi tali terhadap respon gerak model SPAR dalam 3 derajat kebebasan gerakan (*surge*, *heave*, dan *pitch*) serta *tension mooring line* maksimum yang terjadi dengan analisa *frequency domain*. Hasil dari uji eksperimen ini disajikan dalam bentuk RAO gerak dan RAO *tension* yang kemudian dilakukan validasi dengan hasil analisa secara analitis dan numeris dimana untuk analisa numeris menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES EDITOR.



Gambar 1.2. Rencana eksperimen SPAR dengan variasi konfigurasi tali awal
(*Taut*, *Catenary 1*, dan *Catenary 2*)

1.2. PERUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang menjadi bahan kajian dalam tugas akhir ini adalah

1. Bagaimana *respons amplitude operator* dari model SPAR dalam keadaan *free floating* untuk gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* yang ditinjau secara analitis, numerik, dan eksperimen?
2. Bagaimana pengaruh tiga variasi konfigurasi tali (*taut*, *catenary 1*, *catenary 2*) pada model SPAR terhadap gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* ditinjau secara analitis, numerik, dan eksperimen?
3. Bagaimana pengaruh tiga variasi konfigurasi tali (*taut*, *catenary 1*, *catenary 2*) pada model SPAR terhadap tegangan tali tambat maksimum yang terjadi ditinjau secara numerik dan eksperimen (untuk *taut mooring*) ?

1.3. TUJUAN

Tujuan yang ingin dicapai adalah :

1. Mengetahui karakteristik gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch* dari model SPAR kondisi *free floating* melalui eksperimen di lab dan dilakukan validasi dengan perhitungan secara analitis dan numeris.
2. Mengetahui pengaruh variasi konfigurasi tali (*taut*, *catenary 1*, *catenary 2*) pada model SPAR terhadap gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* yang terjadi melalui eksperimen di lab dan dilakukan validasi dengan perhitungan secara analitis dan numeris.
3. Mengetahui pengaruh variasi konfigurasi tali (*taut*, *catenary 1*, *catenary 2*) pada model SPAR terhadap tegangan tali tambat maksimum yang terjadi melalui eksperimen (*taut mooring*) di lab dan dengan perhitungan secara numeris.

1.4. MANFAAT

Manfaat tugas akhir ini adalah memberikan gambaran dan pengetahuan kepada mahasiswa lain yang hendak melakukan eksperimen model SPAR untuk tugas akhir khususnya mengenai olah gerak model arah *surge*, *heave*, dan *pitch* serta *tension* maksimum yang terjadi pada *mooring line* dengan variasi konfigurasi

tali (*taut*, *catenary* 1, *catenary* 2) pada model yang kemudian dilakukan validasi/perbandingan dengan hasil analisa secara analitis dan numeris.

1.5. BATASAN MASALAH

Batasan masalah yang digunakan adalah

1. Analisis dilakukan pada SPAR model dari skala data *prototype* JIP
2. Permodelan fisik struktur di set-up di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dengan kedalaman *towing tank* 1,8 meter.
3. Gelombang yang digunakan pada permodelan adalah gelombang reguler.
4. Teori gelombang yang digunakan adalah teori gelombang *airy*.
5. Gerakan struktur yang ditinjau adalah *surge*, *heave* dan *pitch*.
6. Gerak bangunan apung merupakan gerak *uncoupled*.
7. Beban lingkungan yang diperhitungkan hanya beban gelombang.
8. Asumsi lokasi operasi SPAR disesuaikan dengan kondisi tes dan Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS.
9. Jumlah tali mooring 4 buah dengan tali yang sama.
10. Arah gelombang yang ditinjau adalah gelombang dengan sudut datang 0° .
11. Tinggi gelombang yang digunakan adalah 5 cm.
12. Nilai damping diabaikan dalam melakukan perhitungan analitis.
13. Interaksi sistem tambat dengan tanah diabaikan.
14. Tidak meninjau biaya pada struktur.

1.6. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan dari laporan ini sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan, penulis akan menjelaskan mengenai latar belakang penelitian yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang ingin dicapai, manfaat yang diharapkan akan diperoleh dari tugas akhir ini beserta beberapa batasan masalah yang membatasi analisa yang akan dilakukan.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini berisi tinjauan pustaka dan dasar teori, yaitu hal-hal yang menjadi acuan dan teori-teori yang digunakan penulis untuk mengerjakan tugas akhir ini. Persamaan-persamaan, teori dan landasan-landasar yang digunakan akan dibahas secara detail pada bab ini.

BAB III METODOLOGI DAN PERCOBAAN

Pada bab metodologi penelitian, penulis akan menjelaskan langkah-langkah pengerjaan untuk menyelesaikan tugas akhir ini dan metode-metode yang digunakan.

BAB IV ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai pemodelan fisik, analisa terhadap gerakan struktur dan pembahasan terhadap hasil analisa, serta verifikasi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

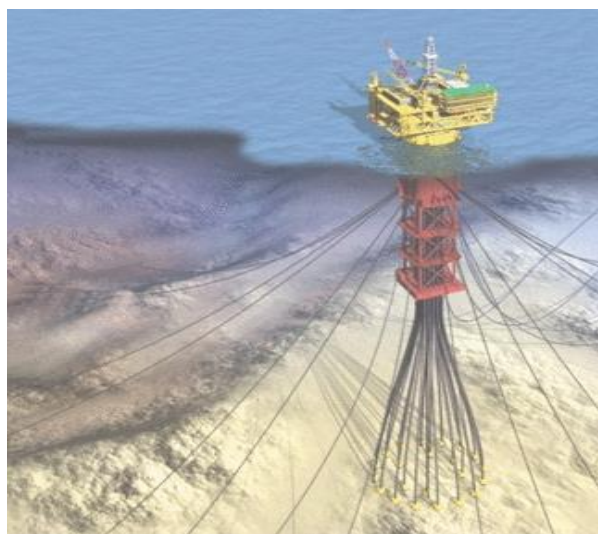
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan analisa serta saran yang bermanfaat untuk penelelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*) termasuk sebagai salah satu jenis bangunan apung lepas pantai yang bersifat lentur yang biasanya digunakan untuk melakukan fasilitas pengoboran, produksi, pemrosesan, maupun penyimpanan minyak dan gas alam pada perairan dalam (Sudhakar et al, 2011). Selain itu, SPAR *floating offshore wind turbine* (FWOT) digunakan untuk sumber energi terbarukan yang cocok di lingkungan laut dalam (Sinpyo et al, 2013). SPAR merupakan struktur silinder terapung dengan *draft* yang dalam hampir sama dengan *buoy* yang berukuran sangat besar dengan dimensi berkisar antara 20-40 m dan *draft* hingga ratusan meter (Tang et al, 2007). Kestabilan SPAR didapat dengan cara membuat titik gravitasi dari SPAR berada dibawah titik *buoyancy* (Chakrabarti, 2005). Bantuan sistem tambat (*mooring system*) yang umumnya berupa *spread chains* konvensional juga ditambahkan di SPAR untuk menjaga SPAR agar tetap di posisinya (Jun et al, 2003). Pola penambatan harus didesain dengan mengacu pada amplitudo gaya yang bekerja, kedalaman air, panjang tali, topografi, dan kondisi dasar bawah laut.



Gambar 2.1. SPAR platform dengan *mooring system* yang digunakan (offshore-mag, 2016)

Frekuensi natural dari semua jenis bangunan SPAR lebih rendah dibandingkan frekuensi gelombang yang terjadi di laut (Ran et al, 1995). Hal ini disebabkan karena SPAR memiliki massa yang besar dan gaya kekakuan pengembali yang rendah (Chen et al, 1999). Periode natural dari bangunan SPAR klasik untuk gerakan *heave* dan *pitch* umumnya panjang karena *waterplane area* yang kecil dibandingkan dengan volume bangunan yang tercelup, oleh karena itu bangunan SPAR biasanya tidak tereksitasi secara vertikal (Jun et al, 2002). Periode natural dari struktur SPAR yang tersebar di Gulf of Mexico umumnya adalah 160 s untuk *surge*, 28 s untuk *heave* dan 60 s untuk *pitch*. Maka dari itu, SPAR merupakan solusi yang tepat untuk beroperasi di daerah dimana kondisi lingkungannya keras karena respon gerakannya yang rendah.

Agarwal et al (2003) menyatakan SPAR mempunyai beberapa keunggulan dibanding struktur terapung lainnya, diantaranya:

- a. Dapat digunakan pada kedalaman laut mencapai 3000 meter.
- b. Dapat menopang *topside* (bangunan atas) yang besar.
- c. *Riser* yang digunakan untuk produksi terletak ditengah-tengah *center well*.
- d. Selalu stabil karena CB (*centre of buoyancy*) terletak di atas CG (*centre of gravity*).
- e. Dapat mentoleransi berbagai gerakan jika dibandingkan dengan struktur terapung lainnya.
- f. Bagian lambung dapat terbuat dari beton ataupun baja.
- g. Memiliki sedikit sekat pada bagian lambung dan dek.
- h. Minyak bumi dapat disimpan dengan biaya yang minimum.
- i. Sistem tambat (*mooring system*) yang dapat dengan mudah dipasang, dioperasikan, dan dipindahkan.

Pada bangunan SPAR, rasio antara dimensi struktur dengan karakteristik panjang gelombang desain umumnya kecil. Oleh karena itu, dapat diasumsikan bahwa medan gelombang secara virtual tidak terganggu oleh struktur dan persamaan Morison dapat diterapkan untuk menghitung gaya gelombang yang bekerja (Montasir et al, 2016). Persamaan Morison ini dapat digunakan untuk menghitung gaya gelombang gerakan *surge* dan *pitch*. Sedangkan, untuk gerakan *heave* dapat menggunakan persamaan Froude-krylov.

Jun et al (2002) melakukan analisa eksperimen pengaruh *damping plate* pada SPAR tipe klasik terhadap gerakan *heave* dan *pitch*. Sudhakar et al (2011) melakukan analisa pengaruh dari *heave plate* terhadap respon hidrodinamik SPAR. Xiaorong et al (2014) melakukan analisa numerik dan eksperimen pengaruh *heave plate* terhadap gerakan model SPAR ketika dikenai beban gelombang regular dan irregular. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa gerakan *heave* pada SPAR berkurang secara signifikan pada daerah resonansi dengan adanya *damping plate*, begitu juga dengan gerakan *pitch* yang terjadi. Gerakan *pitch* dipicu ketika besar gerakan *heave* melebihi batas tertentu saat periode natural *pitch* diperkirakan mencapai dua kali lipat dari periode natural *heave*.

Jaelani (2008) dalam penelitiannya melakukan eksperimen perbandingan pengaruh sistem tambat *taut* dan *catenary* terhadap gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* SPAR tipe klasik dimana dihasilkan gerakan SPAR dengan sistem tambat *catenary* secara umum lebih besar dari *taut* yaitu sebesar 65,23 % untuk *heave*, 76,77% untuk *surge*, dan 17,24% untuk *pitch*.

Seebai et al (2009) dalam penelitiannya menganalisa efek dari sistem tambat *taut* dan *catenary* pada SPAR 5MW *wind turbine*. Dari hasil analisa didapatkan bahwa RAO akselerasi horizontal dan vertikal dengan menggunakan sistem tambat *catenary* lebih besar dibandingkan dengan sistem tambat *taut*.

Sinpyo et al (2013) dalam penelitiannya melakukan eksperimen pengaruh dari variasi titik berat, kekakuan *mooring system* dan lokasi *fairlead* model SPAR terhadap gelombang regular. Dari hasil test terhadap gelombang regular didapatkan RAO gerakan *pitch* dan tegangan tali tambat berkurang seiring bertambahnya frekuensi gelombang, gerakan *pitch* menjadi kecil ketika metacenter kecil. RAO *pitch* untuk metacenter yang besar menurun lebih cepat dibandingkan metacenter yang lebih kecil ketika frekuensi gelombang meningkat. Selain itu, tegangan tali tambat meningkat ketika kekakuan, lokasi *fairlead*, dan titik berat bertambah.

Montasir et al (2016) dalam penelitiannya menganalisa efek dari *pretension* tali tambat terhadap respons dinamis *Truss Spar* didapatkan gaya pengembali dari sistem tambat dapat ditingkatkan dengan penambahan *pretension* tali, ekskursi maksimum yang diijinkan oleh sistem tambat menurun ketika besar *pretension* tali ditingkatkan. Pada umumnya, efek dari *pretension* tali tambat terhadap gerakan dinamis dari *Truss Spar Platform* dapat disimpulkan tidak terlalu signifikan.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Gerak Bangunan Apung

SPAR, sebagai salah satu bangunan apung, mempunyai 6 derajat kebebasan. Menurut Bhattacharyya (1978), Gerak bangunan apung tersebut dibagi menjadi 2 kelompok besar, gerak translasi dan gerak rotasi. Gerak-gerak tersebut adalah:

1. Gerakan translasional

Gerakan translasional adalah gerakan yang searah dengan arah sumbu.

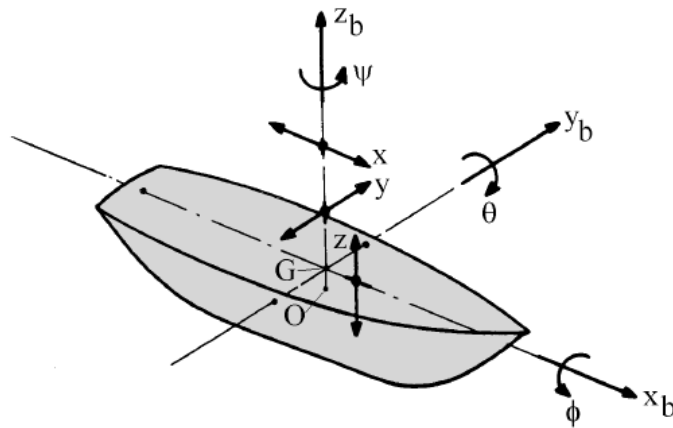
Gerakan translasional terdiri dari :

- *Surging* : gerakan translasi pada arah sumbu x
- *Swaying* : gerakan translasi pada arah sumbu y
- *Heaving* : gerakan translasi pada arah sumbu z

2. Gerakan rotasional

Gerakan rotasional adalah gerakan yang membentuk sudut terhadap sumbu, gerakan rotasional ini terdiri dari :

- *Rolling* : gerakan rotasional terhadap sumbu x
- *Pitching* : gerakan rotasional terhadap sumbu y
- *Yawing* : gerakan rotasional terhadap sumbu z



Gambar 2.2. 6 Mode Gerakan Bangunan Apung (Journée & Massie, 2001)

2.2.2. Teori Gelombang Airy

Dengan mengasumsikan kondisi dasar laut adalah rata dan batasan horisontal pada permukaan bernilai tak hingga maka teori gelombang linear atau yang lebih dikenal dengan teori gelombang Airy dapat diterapkan. Teori gelombang Airy merupakan teori gelombang yang paling sering digunakan dalam menghitung beban gelombang (*wave load*) yang terjadi pada struktur. Teori gelombang Airy juga bisa disebut dengan teori gelombang amplitudo kecil, yang menjelaskan bahwa asumsi tinggi gelombang adalah sangat kecil jika dibandingkan terhadap panjang gelombang atau kedalaman laut. Periode gelombang diasumsikan sebagai variable konstan yang tidak berubah terhadap waktu. Jadi jika dilaut diukur periode gelombang adalah 10 detik, maka periodenya akan tetap 10 detik selama gelombang tersebut menjalar. Nama Teori Gelombang Airy merupakan penghargaan kepada Sir.George Biddell Airy (1845) yang telah menemukan teori ini.

Adapun persamaan-persamaan dari teori gelombang Airy adalah sebagai berikut :

- Kecepatan potensial (ϕ)

$$(\phi)(x,z,d,t) = \frac{g\zeta_0}{\omega} e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.1)$$

- Kecepatan fluida (v_z)

$$\dot{u} = - \frac{g\zeta_0}{\omega} k e^{kz} \cos(\omega t - kx) \quad (2.2)$$

- Percepatan fluida (a_z)

$$\ddot{u} = g\zeta_0 k e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.3)$$

dengan,

ζ_0 = amplitudo gelombang

ω = frekuensi alami gelombang

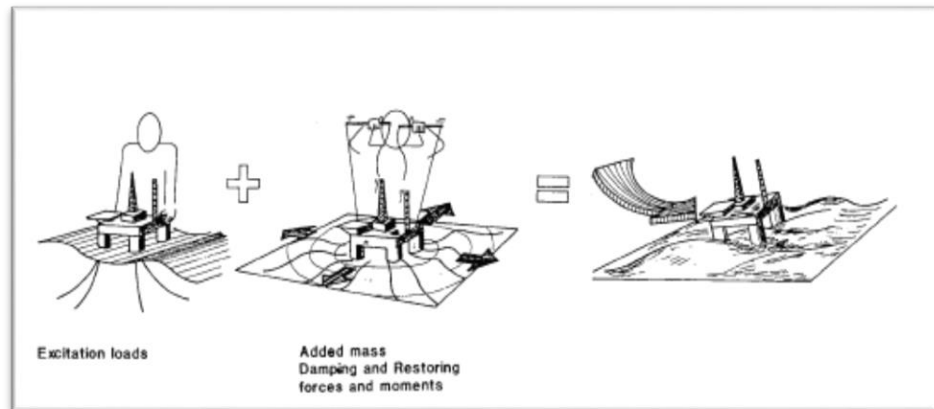
k = angka gelombang

d = kedalaman laut

2.2.3. Beban Hidrodinamika

Suatu struktur terapung akan menerima beban hidrodinamika. Beban hidrodinamika yang diterima oleh struktur terapung dapat dipahami sebagai 2 sub-masalah diantaranya:

1. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat benda ditahan untuk berosilasi yang berada serta menerima gelombang datang. Beban ini disebut sebagai beban akibat eksitasi gelombang. Beban ini secara umum terdiri dari gaya tekanan (yang biasa disebut Froude Krylov Force) dan gaya difraksi.
2. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat struktur digetarkan dengan frekuensi yang sama dengan gaya eksitasi gelombang yang datang. Namun, pada kali ini, tidak ada gelombang yang mengenai struktur. Beban hidrodinamika yang didapat dari sub masalah ini adalah beban massa tambah (*added mass*), beban redaman (*damping*) dan beban kekakuan (*restoring force*). Beban ini bisa juga dianggap sebagai beban reaksi akibat pergerakan struktur.



Gambar 2.3. Beban hidrodinamika pada struktur (Faltinsen, 1990)

Sub masalah 1 dan 2 tersebut dapat dihubungkan secara linear sehingga gaya hidrodinamik total pada struktur terapung merupakan penjumlahan sub-masalah 1 dan sub-masalah 2.

2.2.3.1. Gaya Eksitasi

Gaya eksitasi yang diterima dari struktur terjadi akibat adanya distribusi tekanan yang tidak merata dari gelombang. Dampak dari tekanan yang tidak merata ini disebut sebagai gaya Froude-Krylov. Selain itu, pada struktur dengan ukuran yang cukup besar, keberadaan struktur juga akan menyebabkan perubahan distribusi tekanan. Efek dari perubahan distribusi tekanan akibat adanya struktur yang besar ini disebut dengan gaya difraksi. Gaya Froude-Krylov dapat dicari menggunakan persamaan (2.4).

Persamaan (2.4) menghubungkan antara distribusi tekanan yang diakibatkan medan gelombang dengan luas permukaan dari struktur. Distribusi tekanan gelombang di laut dalam untuk struktur didapat dengan menggabungkan persamaan potensial gelombang dengan persamaan berneouli sehingga didapat persamaan (2.5). Sedangkan gaya difraksi pada struktur terapung perlu dilakukan peninjauan syarat batas dari setiap kasus dan memerlukan pendekatan matematis yang kompleks.

$$F_{FK_i} = \int p n_i dA \quad (2.4)$$

dengan,

- p = Tekanan Gelombang, untuk perairan dalam sesuai dengan persamaan (2.5)
 n_i = Vektor satuan arah luasan kecil
 dA = Luasan kecil struktur

$$p = \rho g \zeta_a e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.5)$$

dengan,

- ρ = Massa jenis air sekitar struktur
 g = Percepatan gravitasi
 ζ_0 = Amplitudo gelombang
 k = Angka gelombang
 z = Posisi di sumbu vertikal, dengan nilai 0 di permukaan air
 ω = Percepatan sudut gelombang
 t = Waktu
 x = Posisi di sumbu horizontal, searah dengan arah gelombang

2.2.3.2. Gaya Reaksi

Gaya reaksi pada struktur dipengaruhi massa, added mass, redaman dan kekakuan. Berikut penjelasan masing-masing komponen tersebut.

a. Massa / *Displacement* SPAR

Massa dari sebuah struktur yang beroperasi di laut dapat dihitung dengan menerapkan konsep hukum Archimedes. Pada penelitian ini, struktur yang dianalisa berupa SPAR dimana massa dari SPAR ini dapat dihitung dengan meninjau bagian struktur SPAR yang terendam di air atau disebut juga *volume displacement* dikalikan dengan massa jenis perairan tersebut. Secara matematis, perhitungan massa/displacement dari struktur SPAR dapat menggunakan persamaan 2.6 berikut ini.

$$(\Delta) = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \times T \times \rho \quad (2.6)$$

dengan,

Δ = massa dari struktur yang tercelup (displacement)

D = diameter struktur

T = Sarat air

ρ = Massa jenis air

b. Added Mass

Bessel (1828) melakukan eksperimen osilasi dalam bentuk pendulum di air dan di udara. Ia menemukan bahwa walaupun dengan massa pendulum yang sama, pendulum yang di dalam air mempunyai massa yang lebih besar daripada pendulum yang di udara. Bessel kemudian menginterpretasikan hal ini sebagai masa tambah (*added mass*).



Sebenarnya tidak ada massa yang ditambahkan ke dalam sistem, efek penambahan massa ini diakibatkan oleh ikut Bergeraknya fluida di sekitar benda terapung. Ikut Bergeraknya fluida tersebut menambah energi kinetik, sehingga diperlukan gaya eksternal. Gaya tersebut jika dibagi dengan percepatan benda maka akan menghasilkan komponen massa. Massa inilah yang dianggap sebagai massa tambah. Massa tambah bergantung terhadap bentuk benda serta mode gerak.

Persamaan (2.7) merupakan formula dari gaya masa tambah, dimana merupakan perkalian antara massa tambah dengan percepatan gerak benda terapung. Sarpkaya menemukan beberapa nilai masa tambah (a) untuk beberapa bentuk sederhana. Untuk gerak silinder, dengan beberapa orientasi dapat dilihat pada gambar 2.4.

$$F_{ma} = m_{a_i} \ddot{\xi}_i \quad (2.7)$$

dengan,

- i = Mode gerak struktur dengan
1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)
- m_a = massa tambah
- $\ddot{\xi}$ = Respon percepatan gerak struktur

	SHAPE	ADDED MASS PER UNIT LENGTH
		← MOTION →
	CIRCLE	$\rho \pi c^2$
	CIRCULAR DISK	$\frac{8}{3} \rho c^3$

Gambar 2.4. Persamaan *added mass* untuk beberapa bentuk benda
(Sarpkaya,2010)

c. Gaya/Momen Redaman

Redaman merupakan dampak yang didapat akibat adanya disipasi energi dari struktur. Redaman akan membuat struktur kehilangan energi kinetiknya. Jika struktur digetarkan di air yang tenang, maka energi kinetik struktur (gerakan) semakin lama akan semakin mengecil, hal inilah yang disebut sebagai redaman. Sama seperti massa tambah, nilai redaman bergantung dari bentuk benda dan mode gerak benda. Sebagai gaya reaksi, gaya ini mempunyai persamaan (2.8). Persamaan ini merupakan perkalian antara redaman benda dengan kecepatan gerak benda. Nilai redaman dapat dicari dengan menggunakan analisa numeris (Chakrabakti, 2005).

$$F_b = b_i \dot{\xi}_i \quad (2.8)$$

dengan,

- i = Mode gerak struktur dengan 1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)
- b = Nilai redaman sistem
- $\dot{\xi}$ = Respon kecepatan gerak struktur

d. Kekakuan

Ketika struktur terapung bergerak di permukaan air tenang, tanpa gelombang, struktur tersebut mempunyai kekakuan untuk kembali ke posisi awalnya. Fenomena ini hanya terjadi pada 3 mode gerak struktur. Mode gerak tersebut adalah gerak heave (ξ_{33}), pitch (ξ_{44}) dan roll (ξ_{55}). Gaya ini dipengaruhi oleh karakter hidrostatis struktur. Gaya reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda disebut gaya pengembali (*restoring force*) yang mempunyai persamaan (2.9). Persamaan ini merupakan perkalian antara kekakuan dengan displacement gerak.

$$F_c = c_i \xi_i \quad (2.9)$$

dengan,

- i = Mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)
- c = Kekakuan struktur
- ξ = Respon posisis gerak struktur

Nilai c dari heave, roll dan pitch adalah sebagai berikut :

$$c_3 = \rho g A_{wp} \quad (2.10)$$

$$c_4 = \rho g V \overline{GM}_T \quad (2.11)$$

$$c_5 = \rho g V \overline{GM}_L \quad (2.12)$$

dengan,

ρ = Massa jenis air sekitar struktur

g = Percepatan gravitasi struktur

A_{wp} = Luas permukaan di garis air

V = Volume displacement struktur

\overline{GM}_T = Panjang metacentre melintang

\overline{GM}_L = Panjang metacentre memanjang

2.2.4. Persamaan Gerak

Gerak dari bangunan apung dapat dianalisa menggunakan hukum II Newton yaitu:

$$\sum F = m_i \ddot{\xi}_i \quad (2.13)$$

dengan,

i = Mode gerak struktur dengan

1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)

$\sum F$ = Resultan gaya

m = Massa struktur

$\ddot{\xi}$ = Percepatan struktur

Persamaan (2.13) menunjukkan hubungan antara resultan gaya dengan massa benda dan percepatan benda. Resultan gaya untuk benda terapung merupakan pengurangan gaya aksi dengan gaya reaksi. Hal ini dikarenakan gaya aksi (gaya eksitasi) memberi gaya kepada struktur sedangkan gaya reaksi merupakan gaya yang dilakukan oleh struktur (persamaan 2.14; 2.15)

$$\sum F = F_{eksitasi} - F_{reaksi} \quad (2.14)$$

$$\sum F = F_{eksitasi} - (F_a + F_b + F_c) \quad (2.15)$$

dengan,

$\sum F$	= Resultan gaya
$F_{eksitasi}$	= Gaya eksitasi gelombang
F_a	= Gaya inersia
F_b	= Gaya redaman
F_c	= Gaya pengembali

Dengan memasukkan persamaan (2.7, 2.8 dan 2.9) ke persamaan 2.15; maka didapatkan persamaan 2.16 dan 2.17 sebagai berikut :

$$m_i \ddot{\xi}_i = F_{eksitasi} - (m_{a_i} \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i) \quad (2.16)$$

$$(m_i + m_{a_i}) \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i = F_{eksitasi} \quad (2.17)$$

dengan,

i	= Mode gerak struktur dengan 1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)
$F_{eksitasi}$	= Gaya eksitasi gelombang
m	= Massa struktur
m_a	= massa tambah
$\ddot{\xi}$	= Respon percepatan gerak struktur
b	= Nilai redaman sistem
$\dot{\xi}$	= Respon kecepatan gerak struktur
c	= Kekakuan struktur
ξ	= Respon posisi gerak struktur

Pada kasus bangunan apung yang tertambat persamaan gerak menjadi persamaan 2.18 (Chen X. , 2011)

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 \left[-\omega^2 (\delta_{nm} m_{jk}^{nm} + m_a^{nm}) - i\omega b_{jk}^{nm} + \delta_{nm} c_{jk}^{nm} + c_{jk}^{*nm} \right] \xi_j = F_j^n \quad (2.18)$$

dengan,

- n = 1, 2, 3...M menunjukkan jumlah nth struktur,
- δ_{nm} = symbol Kronecker delta, mempunyai nilai 0 jika $n \neq m$ dan 1 jika $n = m$, sehingga \mathbf{M}_{jk}^{mm} and \mathbf{C}_{jk}^{mm} adalah matriks inersia dan hidrostatis dari bangunan m^{th}
- $m_{a\,jk}^{nm}$ = matriks massa tambah untuk bangunan m^{th} akibat gerak bangunan sendiri ($n = m$), dan matriks massa tambah bangunan m^{th} akibat bangunan n^{th} ($n \neq m$),
- b_{jk}^{nm} = matriks redaman hidrodinamika untuk bangunan m^{th} akibat gerak bangunan sendiri ($n = m$), dan matriks redaman hidrodinamika m^{th} akibat bangunan n^{th} saat ($n \neq m$),
- c_{jk}^{*nm} = matriks kekakuan untuk bangunan m^{th} akibat gerak bangunan sendiri ($n = m$), dan matriks kekakuan m^{th} akibat bangunan n^{th} saat ($n \neq m$),
- F_j^n = matriks gaya eksitasi pada bangunan n^{th} .

Berdasarkan Van Malree dan Van Boom (1991), komponen eksitasi terdiri dari gaya gelombang orde 1 ($F_{j-wv}^{n(1)}$), gaya gelombang orde 2 ($F_{j-wv}^{n(2)}$), arus (F_{j-c}^n), angin (F_{j-w}^n), mesin pendorong (F_{j-th}^n) dan sistem control lainnya (F_{j-ct}^n) seperti sirip penstabil (*stabilizing fins*). Sehingga matriks gaya eksitasi menjadi

$$\mathbf{F}_j^n = \mathbf{F}_{j-wv}^{n(1)} + \mathbf{F}_{j-wv}^{n(2)} + \mathbf{F}_{j-c}^n + \mathbf{F}_{j-w}^n + \mathbf{F}_{j-th}^n + \mathbf{F}_{j-ct}^n \quad (2.19)$$

2.2.5. Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) atau disebut juga dengan *Transfer Function* merupakan fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur.

RAO memuat informasi tentang karakteristik gerakan bangunan laut yang disajikan dalam bentuk grafik, dimana absisnya adalah parameter frekuensi, sedangkan ordinatnya adalah rasio antara amplitudo gerakan pada mode tertentu, ζ_{k0} , dengan amplitudo gelombang, ζ_0 . Secara matematis RAO dapat dituliskan sesuai dengan persamaan 2.20:

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \quad (\text{m/m}) \quad (2.20)$$

dengan:

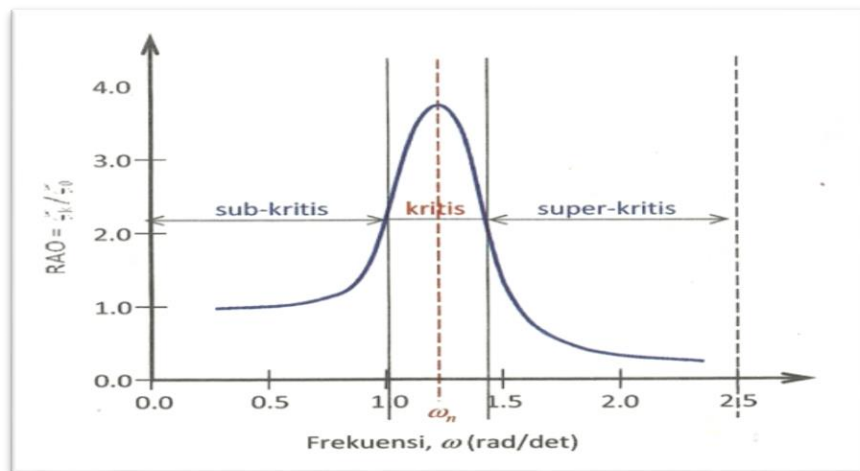
$\zeta_{k0}(\omega)$ = amplitudo struktur (m)

$\zeta_0(\omega)$ = amplitudo gelombang (m)

Respons gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang) (Djtmiko, 2012). Persamaan RAO untuk gerakan translasi sama dengan persamaan 2.20 di atas.

Sedangkan untuk respons gerakan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara gelombang ($k_w = \omega^2/g$) dengan amplitudo gelombang insiden (Djtmiko, 2012):

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2 / g)\zeta_0} \quad (\text{rad/rad}) \quad (2.21)$$



Gambar 2.5. Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung
(Djarmiko, 2012)

Berdasarkan Gambar 2.5, kurva respons gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian:

- Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub-kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *contouring*. Dalam korelasi persamaan hidrodinamis, di daerah frekuensi rendah, atau $\omega^2 < k/(m+a)$, gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan.
- Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respons gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang. Secara hidrodinamis di daerah frekuensi alami, yakni $k/(m+a) < \omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor redaman.
- Ketiga adalah daerah super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang (dengan periode) pendek. Pada daerah ini

respons gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak di atas air yang relatif datar. Oleh karena itu gerakan bangunan laut diistilahkan sebagai *platforming*. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi tinggi ini, dimana $\omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djarmiko, 2012).

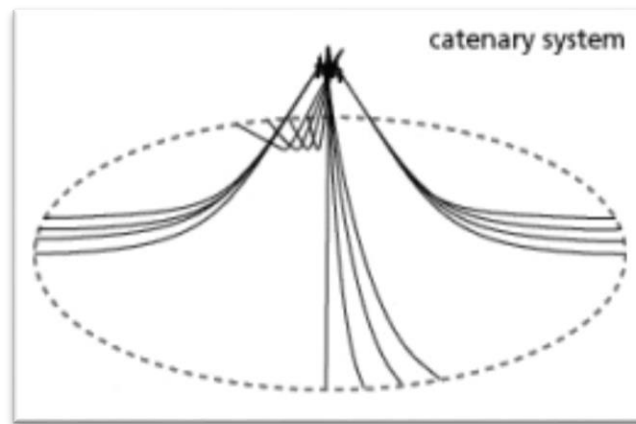
2.2.6. Sistem Tambat (*Mooring System*)

Sistem tambat (*mooring system*) pada struktur terapung lepas pantai seperti SPAR, TLP, Kapal dan lain-lain berfungsi untuk menjaga posisi struktur supaya tetap berada pada posisinya terhadap gaya-gaya yang bekerja seperti angin, arus dan gelombang ketika beroperasi. Secara garis besar, konfigurasi sistem tambat pada SPAR berupa jenis tambat menyebar (*spread mooring*) yang terdiri dari *catenary mooring* atau *taut mooring*. Sistem tambat pada umumnya terangkai dari sejumlah *lines* yang terbuat dari *chain*, kabel (*wire*), atau tali sintetik (*synthetic rope*). Bagian atas dari *mooring line* ini dipasang pada badan struktur terapung di titik-titik yang berbeda sedangkan bagian bawah *mooring line* nya ditambatkan ke dasar laut. Kabel-kabel *mooring* terangkai dari rantai baja (*steel chain*), tali ataupun kombinasi dari keduanya. Gaya tension yang terjadi pada kabel tergantung dari berat kabel, *property* elastisitasnya sendiri dan sistem tambatnya.

Tipe-tipe dari sistem tambat pada struktur bangunan apung lepas pantai utamanya SPAR adalah sebagai berikut :

- *Catenary Line Mooring*

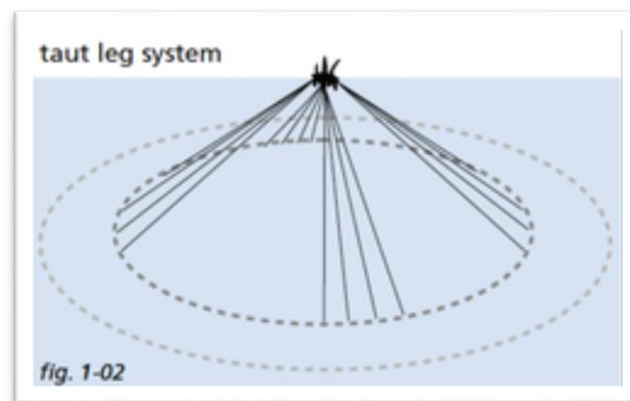
Merupakan sistem tambat pertama yang paling umum. Ketika berada di dasar laut posisi *mooring* horizontal sehingga pada *catenary mooring* ini jangkar hanya dikenakan beban horizontal. Pada *catenary mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri.



Gambar 2.6. Sistem tambat tipe *catenary* (abc-moorings,2010)

- *Taut Mooring System*

Sistem tambat ini memiliki konfigurasi mooring lines dengan tali yang tegang. Perbedaan utamanya dengan *catenary mooring* adalah posisi *anchorleg*. *Taut mooring* ketika berada di dasar laut posisi *mooring* nya bersudut sehingga jangkar harus mampu menahan beban yang terjadi baik beban horizontal maupun vertikal. Pada *taut mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri. Keuntungan dari *taut mooring* jika dibandingkan dengan *catenary mooring* adalah radius tambatannya lebih kecil.



Gambar 2.7. sistem tambat tipe *taut* (Engineering,2006)

2.2.7. Teori Permodelan

Dalam melakukan pemodelan suatu prototipe dengan skala kecil, terdapat tiga hal penting yang harus diperhatikan sehingga model dapat merepresentasikan perilaku geometri struktur, aliran fluida dan interaksi antara keduanya. Oleh karena itu, harus dicari kesamaan dalam geometri, kinematika fluida, dan dinamika dari struktur yang dikenai oleh fluida di sekitarnya.

- Kesamaan geometri

Dalam hal kesamaan geometri, model yang akan dibuat harus memiliki kesamaan dalam bentuk, tetapi berbeda dimensi. Model yang dibuat harus disesuaikan dengan suatu faktor skala sehingga sebanding dengan prototipe yang dijadikan acuan, terutama pada bagian yang terendam. Rasio skala tersebut dapat dengan mudah diasumsikan dengan rasio skala konstan diantara dimensi model dan prototipe.

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda \quad (2.22)$$

Dimana l_p dan l_m dua dimensi yang bersesuaian dari dua struktur yang dinamakan prototipe dan model, dan λ merupakan rasio skala diantara keduanya. Jika seluruh bentuk dan dimensi (diameter, panjang, dll) dari suatu model sudah sebanding dengan prototipe, maka dapat dikatakan keduanya sama secara geometri. Rasio ini selanjutnya akan digunakan sebagai faktor skala untuk model yang didefinisikan sebagai λ .

- Kesamaan Kinematik

Dalam hal kesamaan kinematika, rasio dari kecepatan dan percepatan yang digunakan dalam model harus dijaga. Rasio dari kecepatan pada prototipe dengan kecepatan model yang bersesuaian harus konstan. Hal ini berlaku pada seluruh kecepatan termasuk kecepatan partikel fluida, angin, towing, model pada arah tertentu. Sama seperti sebelumnya, rasio dari percepatan model harus sama dengan prototipe, tetapi dengan rasio yang berbeda dengan kecepatan. Ketika percepatan dan kecepatan model sudah sama dengan prototipe, maka keduanya dapat dikatakan memiliki kesamaan kinematik.

- Kesamaan Hidrodinamik

Hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik ditentukan oleh rasio dari gaya. Ada beberapa hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik berdasarkan masalah interaksi struktur dengan fluida. Kesamaan dinamik antara model dan prototipe didapatkan dengan memenuhi hukum kesamaan tersebut. Dalam kebanyakan kasus, hanya satu dari beberapa hukum skala tersebut yang dapat memenuhi model struktur. Oleh karena itu, hal penting yang perlu dipahami adalah proses fisik yang dialami oleh struktur. Kemudian memilih hukum skala yang paling penting yang mengatur proses tersebut.

- Hukum Model Froude

Bilangan froude didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya gravitasi yang dihasilkan oleh benda pada suatu medium. Bilangan froude didefinisikan dengan persamaan,

$$Fr = \frac{u^2}{(gD)} \quad (2.23)$$

Model froude harus memenuhi hubungan,

$$\frac{u_p^2}{(gD_p)} = \frac{u_m^2}{(gD_m)} \quad (2.24)$$

Dengan mengasumsikan faktor skala kesamaan geometri adalah λ , hubungan antara model dengan prototipe untuk bermacam parameter dapat diperoleh. Tabel berikut merupakan faktor skala dari variabel-variabel yang umum digunakan dan memenuhi persyaratan model Froude.

Tabel 2.1a. *Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling (Chakrabarti, 1994).*

VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
<u>GEOMETRY</u>			
<i>Length</i>	<i>L</i>	Λ	<i>Any Characteristic dimension of the object</i>
<i>Area</i>	L^2	λ^2	<i>Surface area or projected area on a plane</i>
<i>Volume</i>	L^3	λ^3	<i>For any portion of the object</i>
<i>Angle</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>e.g., between members or solid angle</i>
<i>Radius of Gyration</i>	<i>L</i>	Λ	<i>Measured from a fixed point</i>
VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
<i>Moment of Inertia Area</i>	L^4	λ^4	
<i>Moment of Inertia Mass</i>	ML^2	λ^5	<i>Taken about fixed point</i>
<i>Center of Gravity</i>	<i>L</i>	λ	<i>Measured from a reference point</i>
<u>KINEMATICS & DYNAMICS</u>			
<i>Time</i>	<i>T</i>	$\lambda^{1/2}$	<i>Same reference point (e.g., starting time) is considered as zero time</i>
<i>Acceleration</i>	LT^{-2}	<i>1</i>	<i>Rate of change of velocity</i>
<i>Velocity</i>	LT^{-1}	$\lambda^{1/2}$	<i>Rate of change of displacement</i>
<i>Displacement</i>	<i>L</i>	λ	<i>Position at rest is considered as zero</i>
<i>Spring Constant (Linear)</i>	MT^{-2}	λ^2	<i>Force per unit length of extension</i>
<i>Damping Coefficient</i>	MT^{-1}	$\lambda^{5/2}$	<i>Resistance (viscous) against oscillation</i>
<i>Damping Factor</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>Ration of damping and critical damping coefficient</i>
<i>Natural Period</i>	<i>T</i>	$\lambda^{1/2}$	<i>Period at which inertia force = restoring force</i>

Tabel 2.1b. *Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling lanjutan (Chakrabarti, 1994).*

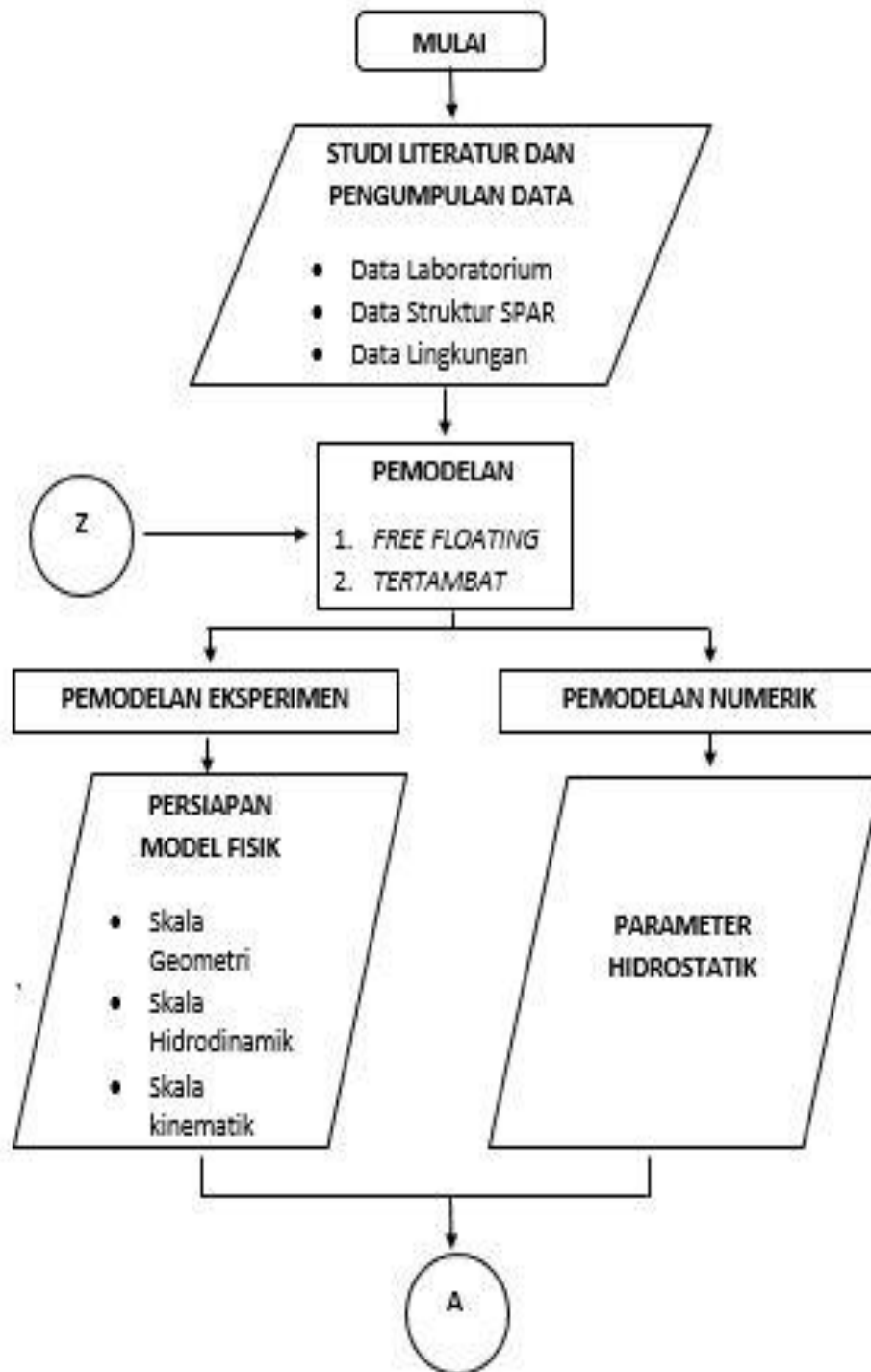
VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
<u>WAVE MECHANICS</u>			
<i>Wave Height</i>	L	λ	<i>Consecutive crest to trough distance</i>
<i>Wave Period</i>	T	$\sqrt{\lambda}$	<i>Time between two successive crests passing a point</i>
<i>Wave Length</i>	L	λ	<i>Distance between two successive crests at a given time</i>
<i>Particle Velocity</i>	LT^{-1}	$\sqrt{\lambda}$	<i>Rate of change of movement of a water particle</i>
<i>Wave Elevation</i>	L	λ	<i>Form of wave (distance from still waterline)</i>
<i>Particle Acceleration</i>	LT^{-2}	1	<i>Rate of change of velocity of a water particle</i>
<u>STABILITY</u>			
<i>Displacement (Volume)</i>	L^3	λ^3	<i>Volume of water moved by a submerged object (or part thereof)</i>
<i>Natural Period</i>	T	$\sqrt{\lambda}$	<i>Period of free oscillation in still water due to an initial disturbance</i>
<i>Metacenter</i>	L	λ	<i>Instantaneous center of rotation</i>
<i>Center of Buoyancy</i>	L	λ	<i>Distance of C.G. of displaced volume from a fixed point</i>

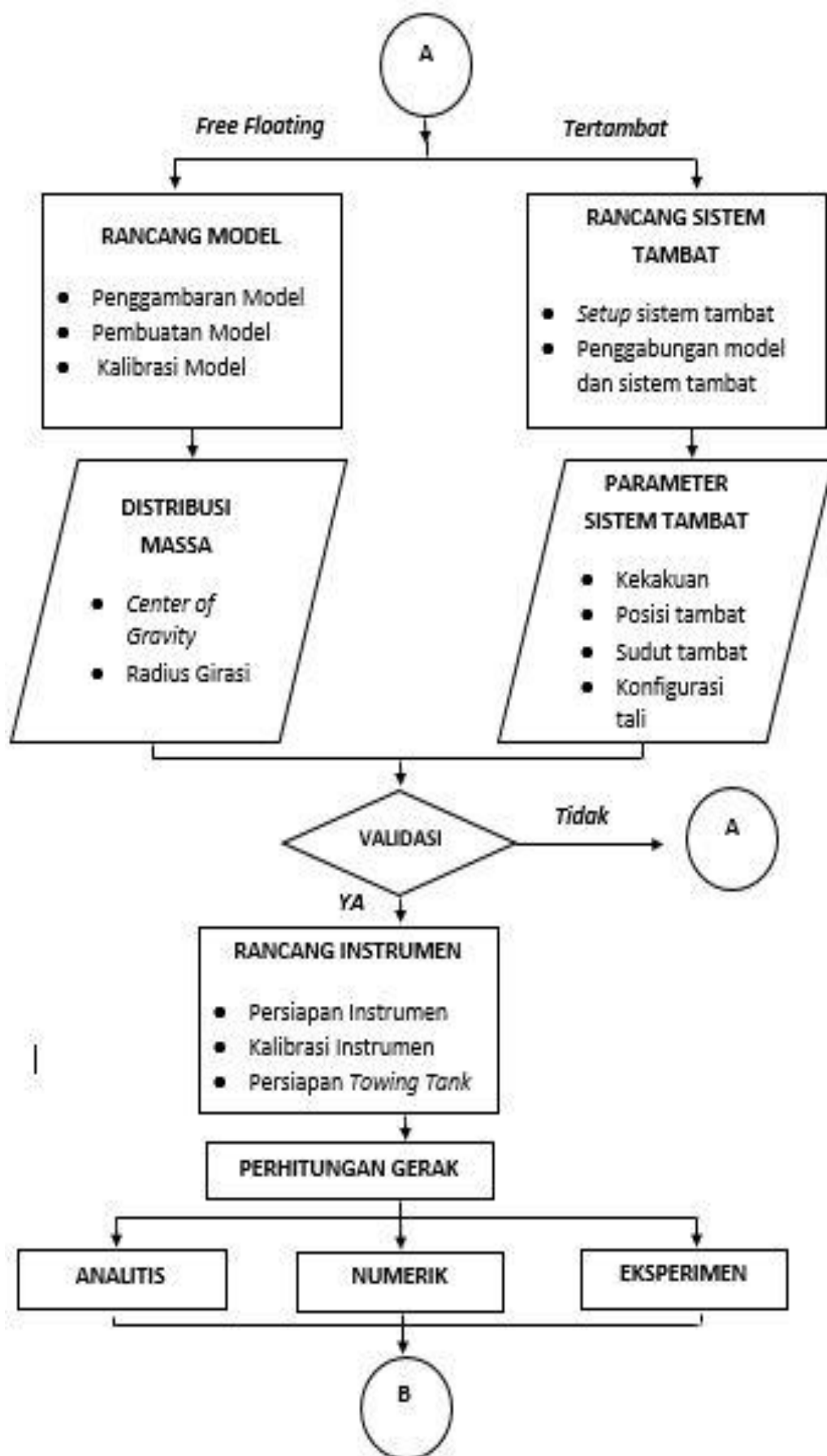
BAB III

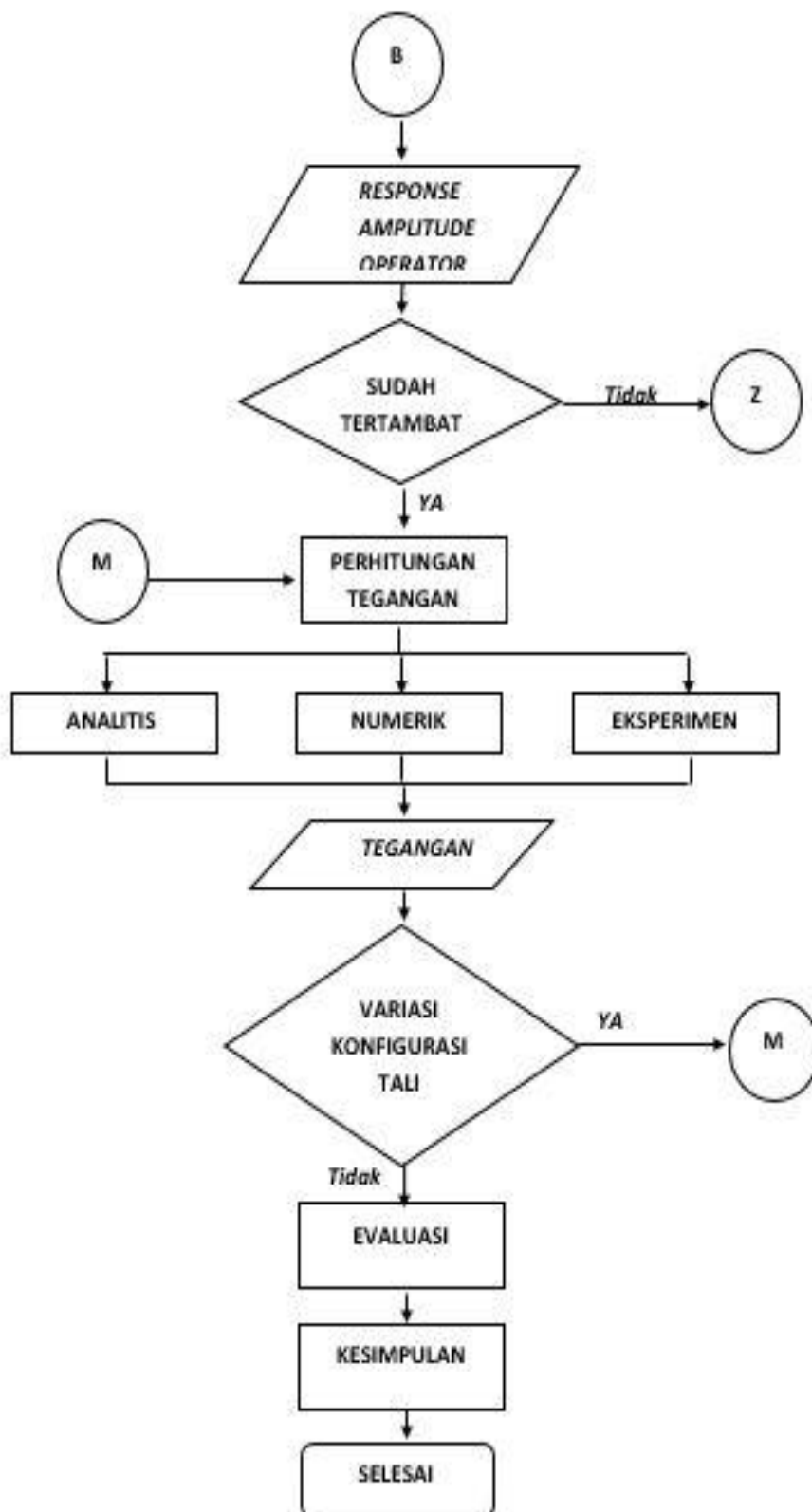
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 DIAGRAM ALIR

Diagram alir pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:







Gambar 3.1. Diagram alir tugas akhir

3.2 PENJELASAN DIAGRAM ALIR

a) Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Studi literatur yang dilakukan adalah mempelajari penyelesaian metode-metode yang dilakukan (analitis, numeris, dan eksperimen) dari model SPAR dengan hasil penelitian sejenis yang pernah dilakukan, membaca buku-buku pendukung, dan publikasi-publikasi ilmiah. Pengumpulan data struktur SPAR yang akan dimodelkan dan dianalisa ini mengacu pada model Mini SPAR dari sebuah penelitian *Spar Model Test Joint Industry Project*. Tabel 3.1. dibawah merupakan data dari *prototype* Mini-SPAR yang digunakan sebagai acuan dari model SPAR yang akan dianalisa. Model SPAR menggunakan tali tambat sebanyak 4 buah yang simetri serta konfigurasi massa dari struktur yang menyesuaikan *center of gravity* dan radius girasi sesuai data yang diperoleh. Data lingkungan dan panjang tali tambat menyesuaikan kemampuan dari *towing tank* yang dimiliki Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS. Dimensi *towing tank* Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS dapat dilihat pada Tabel 3.2. Sementara itu, Tabel 3.3 menunjukkan data lingkungan dari *prototype* Mini SPAR.

Tabel 3.1a. Data Mini SPAR (Deep Oil Technology Inc, 1995)

<i>Description</i>	<i>Quantity</i>	<i>Unit</i>
<u>Hull</u>		
<i>Diameter</i>	16.00	m
<i>Draft</i>	135.03	m
<i>Length</i>	154.23	m
<i>Fairlead Depth</i>	12.74	m

Tabel 3.1b. Data Mini SPAR (Deep Oil Technology Inc, 1995)

<u>Deck</u>		
<i>Height</i>	19.57	m
Panjang	50.29	m
Lebar	50.29	m
<u>Mass Distribution</u>		
<i>Weight</i>	26531.5	ton
<i>KG</i>	62.02	m
<i>Pitch Gyradius</i>	61.47	m
<i>Roll Gyradius</i>	61.47	m

Tabel 3.2. Data *Towing Tank* Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS.

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Panjang	50	m
Lebar	3	m
Kedalaman (penuh)	2	m
Kedalaman (operasi)	1.8	m
Temperatur	27	°C
Jendela Observasi (<i>Toughned Glass</i>)	4	buah

Tabel 3.3. Data Lingkungan

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Kedalaman	750	<i>feet</i>
Periode Gelombang	5-40	s

b) Pemodelan

Model Mini SPAR akan dilakukan pemodelan dalam kondisi *free floating* dan kondisi tertambat yang dianalisa secara analitis, numeris dan eksperimen. Data awal dari Mini SPAR dapat digunakan dalam pemodelan secara numeris yang menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES. Sedangkan untuk pemodelan secara eksperimen di Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS, diperlukan proses pen-skalaan dari model yang dibuat dengan data *prototype* Mini SPAR hingga memenuhi parameter yang ditentukan.

c) Pemodelan Eksperimen dan Numerik.

- Pemodelan Eksperimen

Pada pemodelan eksperimen terlebih dahulu dilakukan persiapan model fisik dari Mini SPAR. Tahap ini meliputi pen-skalaan model dari segi geometri prototipe, kinematik, dan hidrodinamik sistem. Penskalaan Geometri dilakukan dengan menyesuaikan kondisi Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS serta material model yang tersedia di pasaran. Selain itu pada tahap pen-skalaan hidrodinamik, digunakan Hukum Model Froude karena hanya terbatas memperhatikan gaya inersia dan gravitasi. Kemudian, model harus mempunyai karakteristik distribusi massa yang sesuai dengan hasil skala data prototipe.

- Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik *prototype* Mini SPAR dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES. Analisa yang dilakukan pada MOSES adalah dengan menggunakan metode difraksi. Data-data yang diperlukan pada MOSES untuk melakukan analisa ini antara lain :

1. Dimensi SPAR (diameter dan tinggi SPAR).
2. Kedalaman perairan.

3. Sarat (*draught*) SPAR.
4. Massa jenis air.
5. Parameter hidrostatik (Titik berat, radius girasi sumbu x, radius girasi sumbu y dan radius girasi sumbu z).
6. Arah gelombang.
7. Periode gelombang.
8. *Properties mooring system*

Pemodelan numerik dilakukan ketika SPAR dalam kondisi *free floating* dan menggunakan sistem tambat.

d) Parameter Hidrostatik

Validasi model perlu dilakukan ketika melakukan pemodelan dalam metode numerik dan eksperimen. Perbedaan hasil pemodelan pada metode numerik dan eksperimen tidak boleh terlalu besar. Presentase perbedaan hasil pemodelan yang disyaratkan dalam metode numerik dan eksperimen adalah sebesar 5%. Parameter-parameter yang perlu dilakukan validasi adalah:

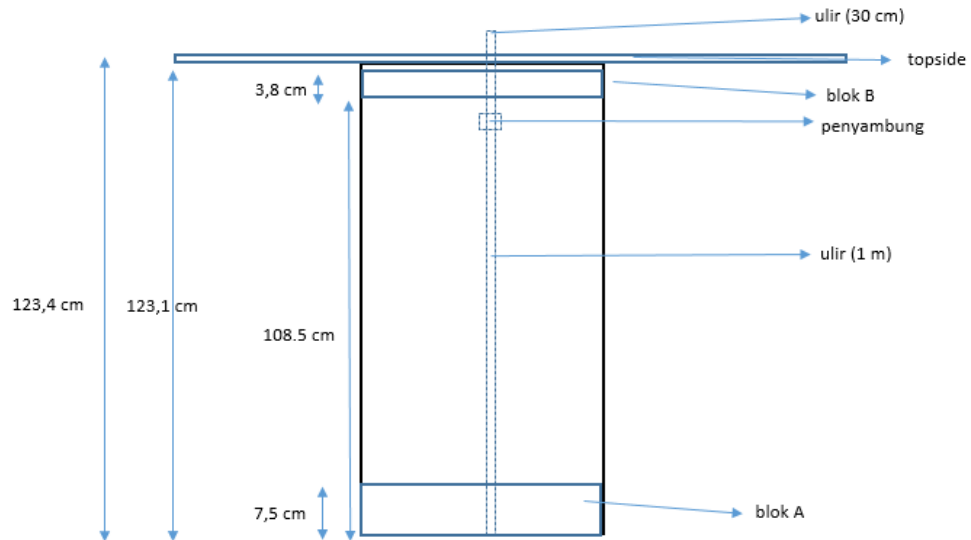
- *Displacement*
- Posisi pusat massa (*Centre of Gravity*) sumbu x (LCG), sumbu y (TCG) dan sumbu z (VCG)
- Jari-jari girasi sumbu x (R_x), sumbu y (R_y) dan sumbu z (R_z)

e) Rancang Model

Setelah didapatkan dimensi awal model (*draft*, titik berat, radius girasi, lebar dan tinggi) dengan menggunakan pemodelan geometri dibuat penggambaran model dengan menggunakan perangkat lunak Autocad. Dalam tahap ini digambarkan model SPAR bagian luar dari *keel* hingga *topside* dengan menggunakan skala dimensi yang telah dibuat sesuai dengan perbandingan data *prototype* Mini SPAR.

Model SPAR dibuat sesuai dengan detail gambar yang telah digambarkan dan untuk komponen materialnya disesuaikan dengan ketersediaan material di pasaran serta hasil perhitungan *pre-initial* desain dari model. Lambung (*hull*) dari model SPAR menggunakan paralon dengan diameter dalam (*inner diameter*) 5 inch dan untuk struktur dasar (*keel*) dan *deck* digunakan akrilik. Selanjutnya untuk kompartemen digunakan besi yang berbentuk silinder

pipih yang dijadikan sebagai *ballast* untuk mengatur titik berat dari model agar sesuai dengan skala yang telah ditentukan. Dalam pengaturan ballast digunakan sebuah silinder pejal yang berulir sehingga silinder pipih dapat diatur sesuai kebutuhan.



Gambar 3.2. Desain pemberat dan ulir

f) Kalibrasi Model

Kalibrasi dilakukan untuk memenuhi parameter dimensi yang sudah disesuaikan dengan hasil pemodelan geometri. Pada awalnya *principal dimension* dari model harus disesuaikan dengan *principal dimension prototype* Mini SPAR yang menjadi acuan seperti panjang, lebar dan *draft*. Setelah itu, distribusi massa dari model SPAR meliputi titik berat dan radius girasi disesuaikan dengan data prototype Mini SPAR. Pada penelitian ini model dinyatakan valid / sesuai jika *error* yang terjadi kurang dari 5% dari model aslinya.

g) Rancang Sistem Tertambat

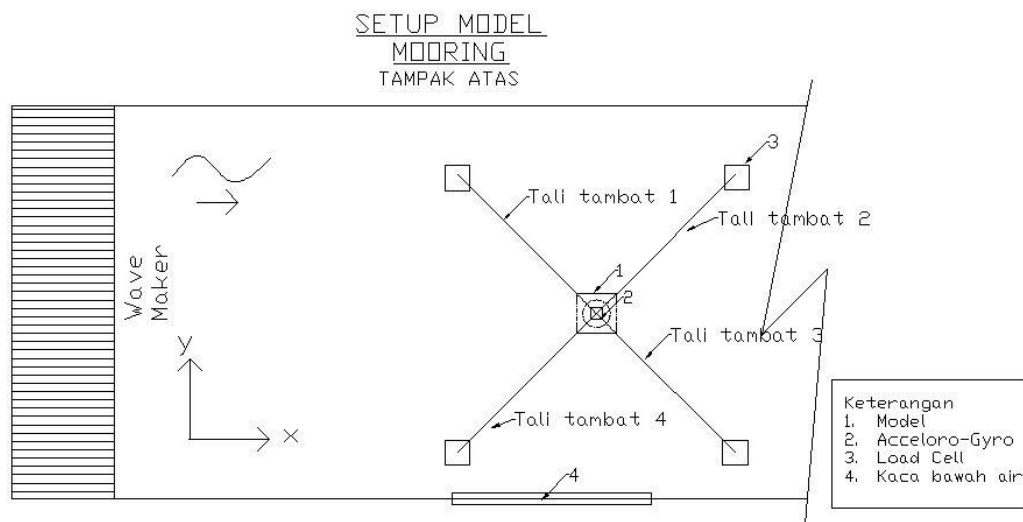
Pada tahap ini, dilakukan perancangan sistem tambat yang akan digunakan pada model SPAR sebelum dilakukan eksperimen di laboratorium hidrodinamika ITS. Gambar 3.4. menunjukkan *layout* dari sistem tambat. Secara garis besar, tahap ini terdiri atas dua poin utama yaitu *setup* sistem tambat dan penggabungan model dengan sistem tambat. Berikut ini merupakan penjelasan untuk tiap poin utama yang dibahas.

- *Setup* sistem tambat

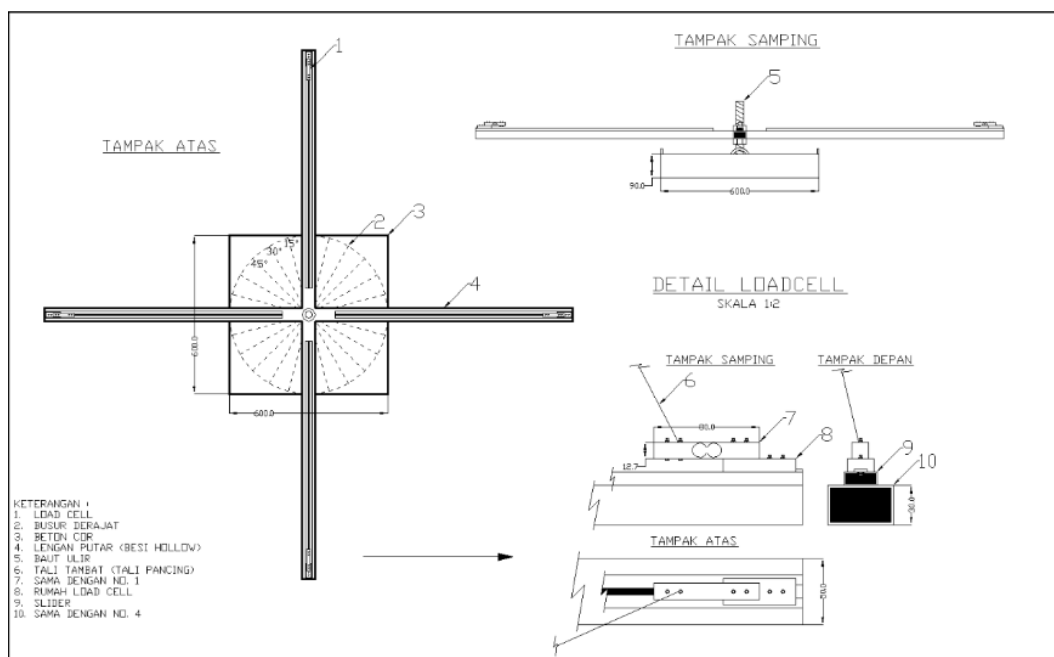
Sistem tambat yang digunakan pada model terdiri dari empat buah *mooring line* yang dihubungkan dengan menggunakan *fairlead*. *Mooring line* ditambatkan pada load cell yang berada di jangkar di dasar kolam Laboratorium Hidrodinamika ITS. Dalam mengukur gerakan model SPAR, alat-alat yang diperlukan dalam setup sistem tambat ini antara lain :

1. *mooring line* sebanyak 4 buah
2. *Image Processing* dan *gyroscope* untuk pengukuran gerak *surge*, *heave* dan *pitch*. Gyroscope diletakkan di topside tegak lurus titik berat model SPAR sedangkan untuk image processing menggunakan kamera yang merekam objek bola merah di atas deck yang digunakan sebagai acuan gerak *surge* dan *heave* model.
3. *Load Cell* sebanyak 4 buah untuk pengukuran tegangan tali.
4. Jangkar di dasar untuk peletakan *load cell* serta pengaturan sudut tali
5. *Fairlead* untuk memasang *mooring line* di model SPAR yang akan diuji sebanyak 4 buah.

Berikut merupakan gambar tampak atas dari rencana pengujian model SPAR yang akan dilaksanakan di Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS.



Gambar 3.3. Rencana sistem tambat yang digunakan pada pengujian model SPAR



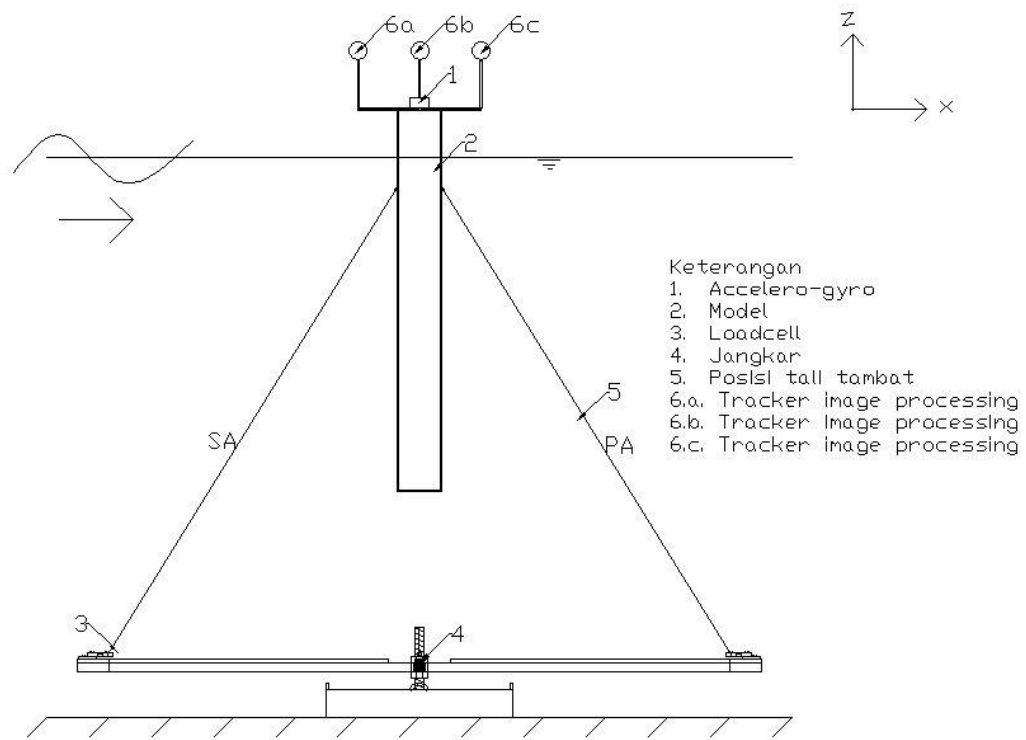
Gambar 3.4. Jangkar dan Load Cell

- Penggabungan model dan sistem tambat

Berikut ini merupakan tahapan penggabungan model SPAR dan sistem tambat sebelum dilakukan tes di laboratorium Hidrodinamika ITS. Gambaran mengenai penggabungan ini dapat dilihat di Gambar 3.6.

- a. Model SPAR diletakkan di kolam uji dalam kondisi terapung bebas

- b. Tali *mooring* yang berasal dari model diletakkan ke *load cell* untuk diukur tegangannya.
- c. Posisi *loadcell* disesuaikan dengan sudut tali dan konfigurasi tali yang diinginkan.
- d. Pada bagian *topside* dipasang *gyroscope* untuk pengukuran gerak SPAR dan juga objek bola berwarna merah sebanyak tiga buah yang direkam menggunakan kamera untuk data image processing yang menghasilkan gerak *heave* dan *surge* dari model.



Gambar 3.5. Model SPAR dengan sistem tambat

h) Parameter Sistem Tambat

Pada tahap ini, parameter sistem tambat yang digunakan pada model SPAR akan dijelaskan secara detail. Parameter sistem tambat yang digunakan antara lain kekakuan tali tambat, posisi tambat, sudut tambat dan konfigurasi tali. Berikut ini adalah penjelasan dari tiap parameter sistem tambat yang digunakan.

- Kekakuan tali tambat

Kekakuan tali tambat dipengaruhi oleh *properties* dari material yang digunakan. Modulus elastisitas material mempengaruhi kekakuan tali tambat yang digunakan. Semakin besar kekakuannya, semakin besar pula periode natural dari struktur. Data *properties* mooring line dari *prototype* Mini SPAR hasil penelitian JIP yang menjadi acuan model SPAR yang dibuat dapat dilihat di Tabel 3.4

Tabel 3.4. *Properties* tali tambat dari *prototype* SPAR

	Model	SPAR	Satuan
Length	1.8	225	m
Diameter	0.62	115	mm
Axial Stiffness (EA)	0.604	1175000	KN

- Posisi *Fairlead*

Fairlead berfungsi untuk menyambungkan *mooring line* dengan model. Pada model, *fairlead* menggunakan mata pancing yang di bor dan dipasang sesuai dengan desain.

- Sudut *Fairlead*

Sudut *fairlead* dari *mooring line* yang digunakan pada analisa model SPAR ini adalah sebesar 30 derajat. Sudut ini didapatkan ketika tali di setting dalam keadaan tegang.

- Konfigurasi Tali

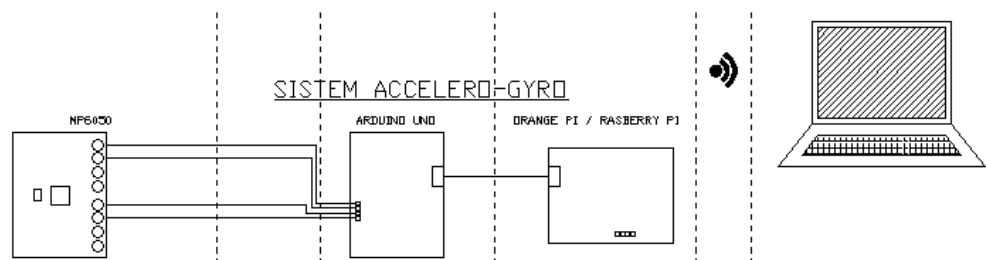
Konfigurasi tali pada awal pengujian model SPAR ini di *setting* dalam keadaan paling tegang. Panjang tali disesuaikan dengan *loadcell* di dasar kolam agar didapatkan kondisi awal tali yang tegang (*taut*). Dari autocad, didapatkan panjang tali dalam kondisi tegang adalah 1,8 m.

i) Instrumen Laboratorium

Instrumen Laboratorium yang digunakan dalam analisa model SPAR ini antara lain Gyroscope untuk mengukur gerakan *pitch* model, *Image Processing* untuk mengukur gerakan *heave* dan *surge* model, *Load Cell* untuk mengukur tegangan tali pada sistem tambat. Ketiga alat ini mencatat data

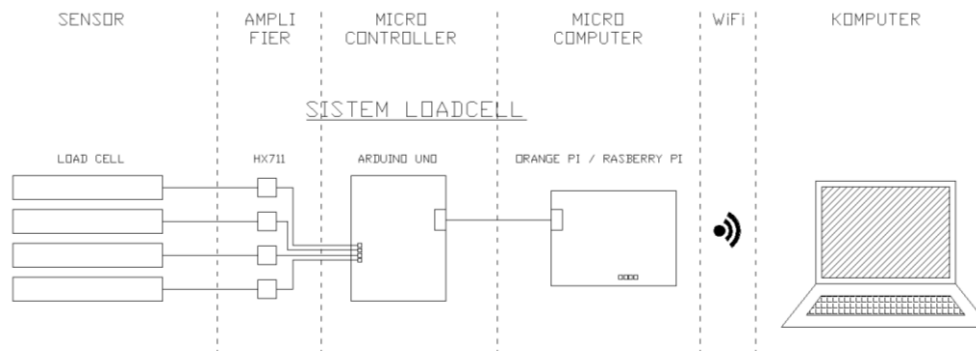
secara bersamaan ketika uji eksperimen dilakukan. Berikut merupakan penjelasan dari alat-alat pengukuran tersebut.

1. Gyroscope merupakan sensor gyro yang digunakan untuk menentukan orientasi gerak dengan prinsip ketetapan momentum sudut yang mendeteksi gerakan sesuai gravitasi. Keluaran dari Gyroscope berupa kecepatan sudut dari tiga sumbu yang ditinjau. Gerak rotasional sumbu y (pitch) dari model SPAR diukur menggunakan giroskop. Instrumen giroskop yang digunakan adalah giroskop MPU 6050 GY87. Instrumen ini mampu mengeluarkan sudut yang dibentuk oleh MPU 6050. Pada MPU 6050 terdapat sumbu orientasi x, y dan z sebagai orientasi nilai yang dihasilkan keluaran dari MPU 6050. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh microcontroller Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam angka angka digital. merupakan sebuah sensor yang dapat mencatat gerakan yang terjadi dalam 6 derajat kebebasan. Gambar 3.6 menjelaskan tentang pengukuran gerak menggunakan Gyroscope.



Gambar 3.6. Diagram Sistem Accelero-gyro

2. Load Cell digunakan untuk mengukur tegangan tali maksimum pada sistem tambat ketika eksperimen model SPAR. Untuk mengukur tegangan tali ini, pada *Load Cell* terdapat sensor *strain gauge* yang mengukur tegangan yang diberikan oleh tali dengan cara mengubah suatu gaya tekanan menjadi besaran listrik. Perubahan tegangan tali ini akan memberi sinyal tegangan listrik. Tegangan listrik yang dihasilkan *loadcell* akan diperbesar menggunakan *amplifier* yang kemudian akan di digitasi menggunakan *microcontroller* yang kemudian akan berubah menjadi data digital di laptop.



Gambar 3.7. Diagram Sistem Load Cell yang digunakan pada eksperimen

3. *Digital image processing* adalah proses pengolahan gambar dua dimensi oleh perangkat komputer. *Digital image processing* merupakan proses pengambilan atribut-atribut pada gambar dengan input dan output berupa gambar. Pada penelitian ini, *Digital image Processing* dimanfaatkan untuk pendeteksian objek pada video yang digunakan untuk menganalisa gerakan translasi naik-turun (heave) dan maju-mundur (surge) yang terjadi pada objek berupa model SPAR yang mengapung di dalam air dan terkena gelombang dengan variasi periode gelombang.

Pada penelitian ini, model SPAR yang mengapung di air dipasang tiga buah tutup botol berwarna merah yang digunakan untuk menganalisa gerak pada objek. Warna merah dipilih untuk menghindari kesamaan warna dengan objek yang lain dimana untuk model SPAR warna yang digunakan adalah hijau dan kuning, warna air kolam uji adalah biru dan warna dinding di laboratorium Hidrodinamika ITS adalah putih. Dari kondisi tersebut, dipilihlah warna merah yang digunakan untuk analisa image processing ini agar data dapat dibaca secara akurat dan output yang diharapkan tidak mengalami error. Objek yang ditinjau adalah tutup botol yang berada di titik pusat model sedangkan tutup botol yang diletakkan di ujung model digunakan untuk perhitungan skala pixel dan validasi data yang dihasilkan. Proses image processing ini dilakukan dengan menggunakan satu buah kamera webcam logitech c270 yang merekam video dimana dari video tersebut terdiri dari banyak frame-frame yang kemudian diolah menggunakan bantuan perangkat lunak

visual basic c++. Gambar 3.8. dibawah ini merupakan kamera dan objek benda tracking yang digunakan dalam *image processing*.



Gambar 3.8. Kamera dan benda yang ditracking

j) Metode Analitis

Dalam metode analitis, perhitungan gaya beban dilakukan dengan perhitungan gaya Froude Krylov dan gaya Morison. Gaya ini kemudian akan diolah menjadi respon gerak. Perhitungan dilakukan pada kondisi *free floating* dan kondisi tertambat. Perhitungan hanya dibatasi untuk melakukan perhitungan di mode gerak *surge*, *heave* dan *pitch*. Output dari perhitungan gerak secara analitik adalah diagram RAO untuk *surge*, *heave* dan *pitch* baik dalam kondisi terapung bebas atau tertambat.

Perhitungan tegangan tali dapat dilakukan dengan menggunakan gerak total dari struktur akibat pengaruh *mooring*. Dengan diketahui gerak total maka akan diketahui juga deformasi tali. Dengan menganggap kekakuan *mooring line* konstan (*taut mooring*), tegangan mooring dapat diketahui dengan mengalikan deformasi dengan kekakuan. Output yang diharapkan adalah adanya *Tension Response Operator*.

k) Metode Numerik

Pada tahap ini, dilakukan analisa RAO *prototype* model SPAR yang digunakan sebagai acuan model sesuai dengan data dari penelitian *Joint Industry Project* (JIP) dalam keadaan free floating dan bertambat dengan analisa panel 3D Diffraction method menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES. Tahapan analisa untuk perhitungan numerik RAO dalam keadaan free floating adalah sebagai berikut :

- Prototype SPAR dari data penelitian JIP dimodelkan sesuai dengan dimensi yang ada menggunakan perangkat lunak MOSES. Kemudian, model di bagi menjadi elemen-elemen kecil menggunakan metode difraksi. Proses ini dilakukan pada MOSES tipe file .dat yang khusus digunakan untuk memodelkan struktur yang dianalisa.
- Setelah itu, data *properties* dari struktur di inputkan pada tipe file .cif untuk analisa model yang telah dibuat pada file .dat. Secara analitis, dalam menganalisa perilaku gerak suatu benda digunakan prinsip hukum newton III yaitu gaya aksi = gaya reaksi atau dalam bentuk persamaan dapat dituliskan sebagai berikut, $m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_{wave}$.
- *Displacement* merupakan massa dari struktur ditambah dengan *added mass* struktur itu sendiri. Data yang diperlukan untuk mendapatkan besar dari *displacement* struktur itu sendiri adalah nilai dari *Center of Gravity* (COG) struktur, sarat (*draught*) struktur dan radius girasi struktur.
- Gaya redaman (*damping force*) dari struktur dapat diperoleh dari input perintah Tanaka pada MOSES yang mendefinisikan faktor pengali untuk *damping* yang disebabkan “*eddy making*”. Formulasi yang digunakan untuk gaya redaman Tanaka ini dijelaskan oleh Schmidke pada papernya yang berjudul : *The Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers* (1978). Bangunan SPAR yang dianalisa ini tidak perlu ditambahkan faktor *roll damping*.
- Gaya kekakuan dipengaruhi oleh gerak *heave*, *pitch* dan *roll* pada kondisi *free floating*. Pada MOSES untuk analisa gaya kekakuan ini

disesuaikan dari sarat struktur (mempengaruhi volume dan *water plane area*) dan juga *center of gravity* struktur.

- Gaya gelombang, didapatkan dari input frekuensi/periode gelombang yang ditinjau dimana untuk periode gelombang di laut sendiri berkisar antara 5-40 detik.
- MOSES nantinya akan memberikan keluaran hasil analisa berupa *Response Amplitude Operator* (RAO) struktur dalam keadaan *free floating* untuk tiap gerakan translasi (*surge, sway, heave*) dan rotasi (*roll, pitch, yaw*) yang terjadi untuk tiap frekuensi gelombang dan arah gelombang yang ditinjau.

Sedangkan, tahapan analisa untuk perhitungan numerik RAO dalam keadaan tertambat adalah sebagai berikut :

- Prinsip utama dari digunakannya *mooring system* pada suatu struktur sendiri adalah untuk menambahkan kekakuan pada sistem struktur tersebut sehingga dapat memperkecil gerakan *heave* yang terjadi.
- *Mooring system* pada perangkat lunak MOSES dapat di inputkan pada file.cif dengan menggunakan perintah MEDIT. Perintah MEDIT ini digunakan untuk menginputkan koordinat dari *mooring line* yang dipasang pada struktur, jenis dari *mooring line* yang digunakan (*taut mooring* atau *catenary mooring*), diameter *mooring line*, kedalaman perairan, panjang *mooring line*, diameter *buoyancy* dan berat *mooring line* per satuan panjang, lokasi dari jangkar di *seabed*, dan juga sudut *mooring line*.
- *Pre-tension Mooring line* dapat diinputkan pada MOSES dengan menggunakan perintah -A_TENSION untuk tiap *mooring line* yang ditinjau.
- MOSES nantinya akan memberikan keluaran hasil analisa berupa *Response Amplitude Operator* (RAO) struktur dalam keadaan tertambat untuk tiap gerakan translasi (*surge, sway, heave*) dan rotasi (*roll, pitch, yaw*) yang terjadi untuk tiap frekuensi gelombang dan arah gelombang yang ditinjau.

1) Metode Eksperimen

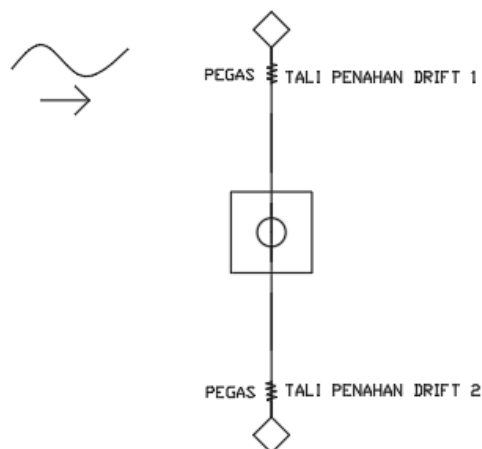
Eksperimen model dilakukan dalam 2 tahap yaitu uji model tanpa tali tambat (*free floating*) dan model dengan tali tambat (*mooring*) dengan variasi konfigurasi tali. Variasi konfigurasi tali dilakukan dengan menambahkan panjang tali pada *mooring line*. Berikut merupakan langkah yang dilakukan dalam perhitungan eksperimen :

- *Run model tanpa tali tambat (free floating)*
 1. Persiapkan model yang telah dibuat dan alat uji yang digunakan.
 2. *Gyroscope* dipasang di *topside* model SPAR tegak lurus dengan titik berat model untuk mengukur gerakan *pitch*. Kamera di depan model dipasang untuk tracking objek bola yang ada di *topside* untuk merekam gerak *surge* dan *heave* menggunakan *image processing*.
 3. Model yang sudah divalidasi diletakkan di lokasi yang sudah direncanakan pada *towing tank*. Persiapan eksperimen di *towing tank* ini perlu sekali diperhatikan untuk menjaga air selalu dalam keadaan tenang untuk mengurangi faktor-faktor yang tidak dibutuhkan agar perhitungan dapat dianggap valid.
 4. Dalam kondisi *free floating* juga dipasang tali penahan drift (*loose rope*) untuk mengakomodir gerak *drift* dari model agar model tidak bergeser terlalu jauh dari posisi awal yang dapat mengganggu proses perekaman data.
 5. Kemudian dilakukan evaluasi apakah model sudah berada di lokasi yang direncanakan atau belum dan pastikan juga air dalam *towing tank* sudah cukup tenang untuk dilakukan run gelombang.
 6. Setelah semua dipastikan sesuai dengan syarat uji run gelombang maka eksperimen dapat dimulai. Jika belum sesuai, maka perlu dilakukan *setup* ulang.
 7. Uji *run* gelombang dilakukan dalam beberapa variasi periode gelombang. Periode gelombang akan disesuaikan dengan hasil penyekalaan periode gelombang di laut (berkisar antara 5-40s) dengan

faktor skala yang digunakan. Dari hasil skala didapatkan periode gelombang yang digunakan adalah sebagai berikut :

Tabel 3.5. Periode gelombang yang digunakan dalam eksperimen

No	Periode Gelombang (s)
1	3,6 detik
2	3,1 detik
3	2,7 detik
4	2,2 detik
5	1,8 detik
6	0,9 detik
7	0,5 detik



Gambar 3.9.. Konfigurasi tali penahan gerak *drifting*

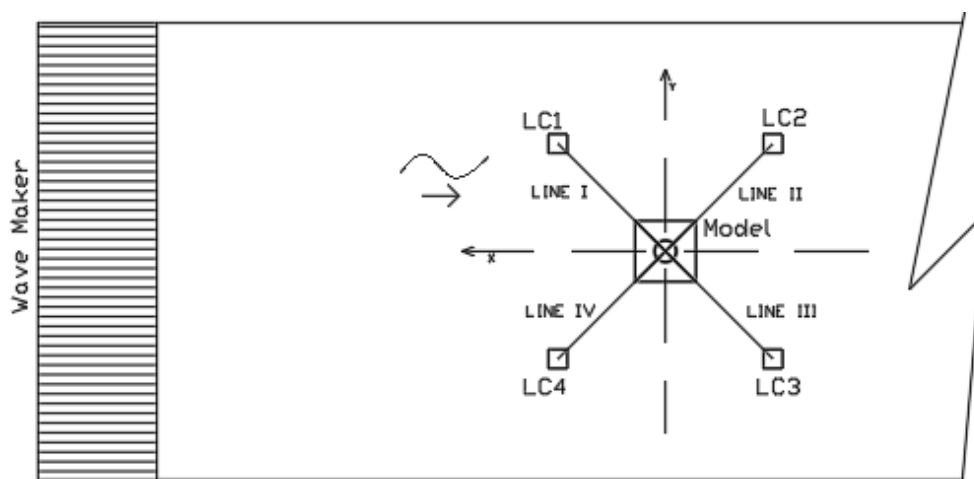
8. Dari hasil pengukuran menggunakan image processing dan gyroscope didapatkan data gerakan model untuk tiap gerakan yang ditinjau yang kemudian diolah untuk menapat respon gerakanya.

9. Hasil pengukuran akan digambarkan dalam bentuk grafik Respons Amplitude Operator (RAO) gerak dari model SPAR untuk gerakan *surge*, *heave* dan *pitch*.

Run model dengan tali tambat (mooring)

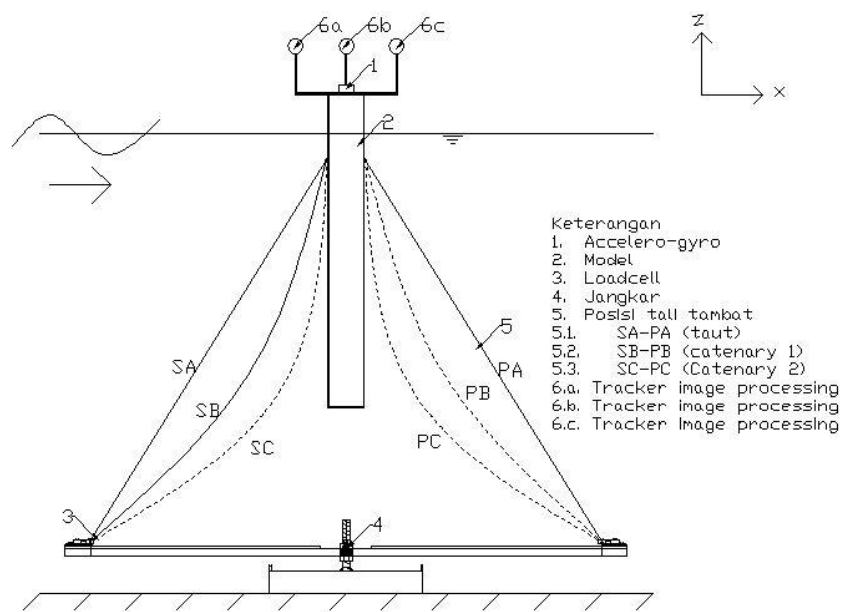
Eksperimen model dengan tali tambat ini memiliki langkah yang hampir sama dengan tanpa tali tambat. Dalam kondisi tertambat tegangan tali juga diperhitungkan dengan menambah instrumen *load cell*.

1. Jangkar diletakkan di dasar kolam untuk mengikat tali tambat agar mendekati kondisi asli di lepas pantai yang diikatkan di dasar laut. Jangkar dilengkapi dengan *load cell* untuk mengukur tegangan tali.
2. Pengaturan posisi jangkar dengan menggerakkan load cell mendekati atau menjauhi model struktur.
3. Pengaturan konfigurasi tali dilakukan dengan menarik tali sehingga sesuai konfigurasi tali (*taut* atau *catenary*) yang dikehendaki.
4. Dilakukan evaluasi apakah *setup* model sudah sesuai dengan rencana atau belum. Jika belum sesuai dengan rencana penelitian maka perlu dilakukan *setup* kembali. Jika sudah sesuai dengan rencana, maka eksperimen dapat dimulai.



Gambar 3.10. Konfigurasi eksperimen model SPAR tertambat

5. Selama eksperimen output dari *load cell*, *Image Processing* dan Giroskop akan diamati untuk perhitungan gerak struktur dan tegangan tali
6. Eksperimen ini dilakukan dengan variasi konfigurasi tali sebagai berikut :
 - Konfigurasi tali dari *mooring line* di variasikan dari keadaan *tegang* (taut), *catenary* 1 dan *catenary* 2. Variasi ini dilakukan dengan menambah panjang tali dari *mooring line* dengan tidak merubah posisi dari *load cell* yang digunakan untuk menghubungkan *mooring line* di dasar dan juga untuk mencatat tegangan tali maksimum yang terjadi. Uji *run* gelombang dilakukan pada setiap variasi konfigurasi tali yang direncanakan. Jadi, setiap sekali uji *run* gelombang model tertambat dengan konfigurasi tali awal sampai keluar hasil pengukuran, setelah data hasil pengukuran didapatkan konfigurasi tali diatur kembali dengan menambahkan panjangnya kemudian *run* gelombang dilakukan kembali dan seterusnya sampai semua konfigurasi tali yang direncanakan diuji.



Gambar 3.11. Setup model dengan variasi konfigurasi tali (taut, catenary 1 dan catenary 2).

3.3 Timeline

Proses penelitian ini akan berlangsung selama V bulan dengan rincian sebagai berikut:

Tabel 3.6. Timeline pengerjaan tugas akhir

No	Kegiatan	Bulan I				Bulan II				Bulan III				Bulan IV				Bulan V			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	Studi Literatur dan Pengumpulan Data																				
2	Permodelan Eksperimen Persiapan Model Fisik																				
3	Permodelan Numerik																				
4	Rancang Model dan Sistem Tambat																				
5	Rancang Instrumen																				
6	Perhitungan Gerak																				
	Analitis																				
	Numerik																				
	Eksperimen																				
7	Perhitungan Tegangan																				
	Analitis																				
	Numerik																				
	Eksperimen																				
8	Penyusunan Laporan																				

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

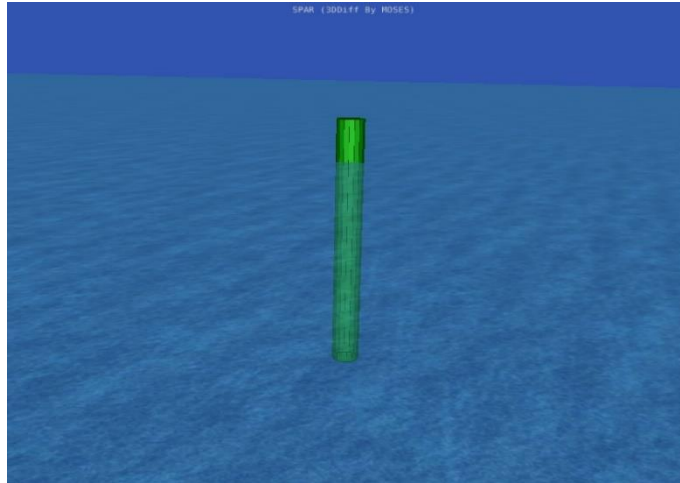
6.1. PEMODELAN STRUKTUR

6.1.1. Pemodelan Numerik

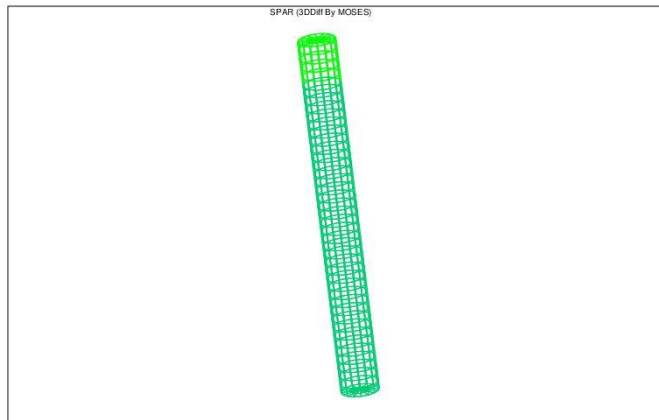
Perhitungan numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MOSES Editor 7. Langkah yang perlu dilakukan adalah memberi perintah membuat lingkaran di file ekstensi .dat MOSES (LAMPIRAN). Tabel 4.1 menampilkan dimensi dari SPAR yang digunakan untuk pemodelan numerik. Data SPAR diambil dari Mini SPAR *Joint Industry Project* (1995). Model yang dibuat di MOSES di-*meshing* dengan ukuran *panel* maksimal sebesar 3.5 m. Model numerik yang sudah di-*meshing* terlihat di Gambar 4.1, Gambar 4.2 dan Gambar 4.3.

Tabel 4.1. Data dimensi struktur SPAR. (Joint Industry Project, 1995)

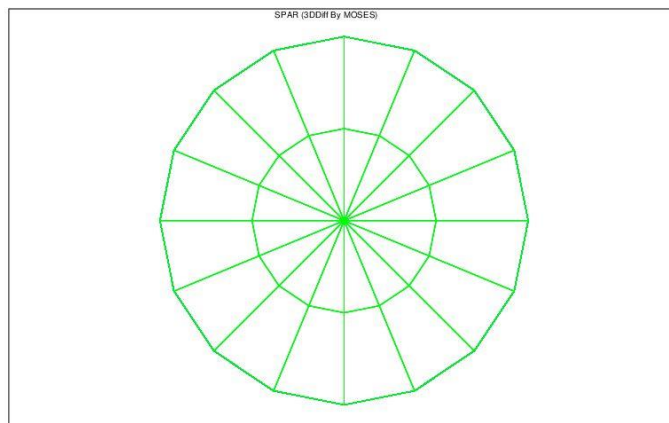
Deskripsi	Prototype	
	Besaran	Satuan
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Tinggi	154.23	m
Posisi <i>Fairlead</i>	12.74	m
Panjang deck	50.29	m
Lebar deck	50.29	m



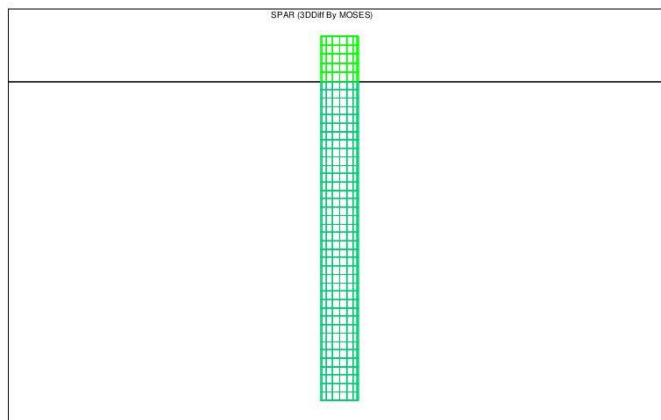
Gambar 4.1. Tampak isometri model numerik.



Gambar 4.2. Tampak isometri model numerik dengan *meshing*.



Gambar 4.3. Tampak atas model numerik dengan *meshing*.



Gambar 4.4. Tampak depan model numerik dengan *meshing*.

Pemodelan dengan menggunakan MOSES juga dilakukan dengan memasukkan sarat dan jari-jari girasi. Bagian struktur (Gambar 4.2 dan Gambar 4.4) yang berwarna hijau tua menunjukkan bagian di bawah air, sedangkan yang berwarna hijau muda merupakan bagian tidak di atas air. Jari-jari girasi SPAR dimasukkan ke dalam MOSES sesuai dengan Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Distribusi massa SPAR. (Joint Industry Project, 1995)

Deskripsi	Prototype	
	Besaran	Satuan
Massa Total	26531.52	Ton
<i>Keel to Gravity</i> (KG)	62.02	m
Jari-jari girasi gerak <i>pitch</i>	61.47	m
Jari-jari girasi gerak <i>roll</i>	61.47	m

6.1.2. Pemodelan Eksperimen

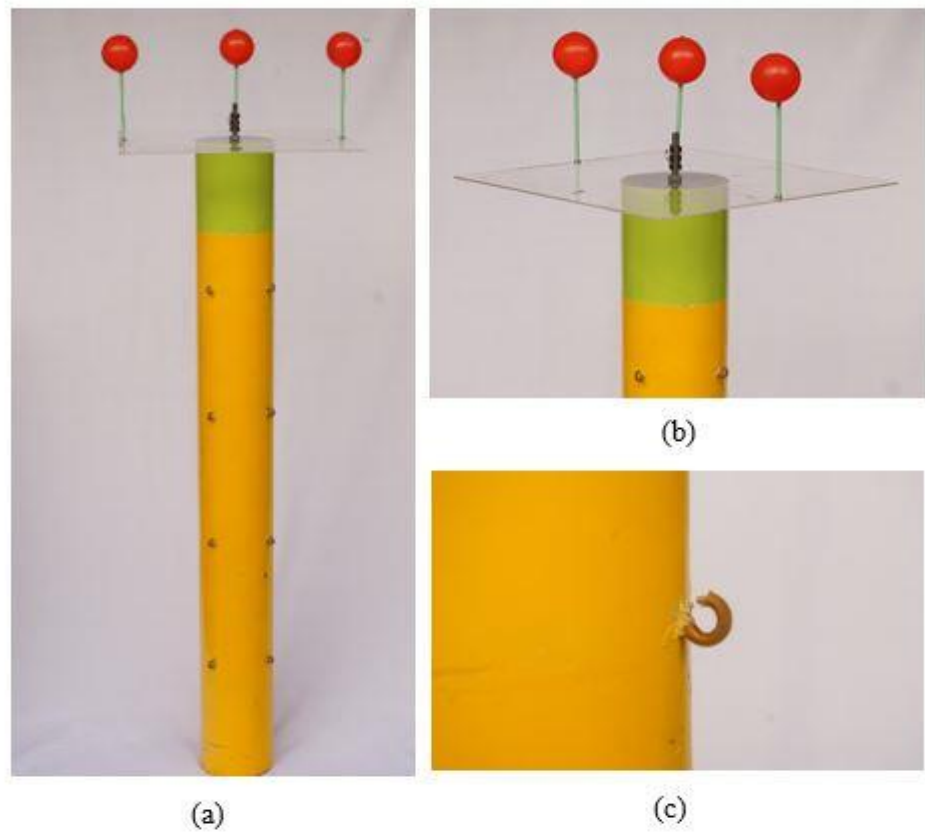
Dalam melakukan studi eksperimen, SPAR dimodelkan menggunakan skala 1:125. Proses penskalaan yang dilakukan mengikuti aturan Froude sesuai Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Hasil penskalaan model SPAR sesuai dengan hukum Fraude.

	Prototype	Faktor skala	Model
Massa (kg)	26531524.910	λ^3	13.584
Diameter (m)	16.000	λ	0.128
Draft (m)	135.010	λ	1.080
Panjang (m)	154.210	λ	1.234
KG (m)	62.022	λ	0.496
Radius girasi pitch (m)	61.470	λ	0.492
Radius girasi roll (m)	61.470	λ	0.492
Periode gelombang (s)	40, 35, 30, 25, 20, 10, 5.5	$\lambda^{1/2}$	3.6, 3.1, 2.7, 2.2, 1.8, 0.9, 0.5

Dimensi dari *prototype* dan model fisik dapat dilihat di Tabel 4.1. Pipa PVC digunakan sebagai lambung, akrilik sebagai geladak dan kait sebagai *fairlead*. Perakitan model dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Pipa PVC 5” digunakan untuk menyesuaikan ukuran diameter dari model. Pipa tersebut kemudian dipotong sesuai dengan tinggi lambung. Bagian bawah dari pipa PVC ditutup dengan akrilik. Akrilik pada bagian bawah ditempel ke pipa PVC menggunakan lem lalu diberi dempul untuk menghindari kebocoran. Untuk memastikan tidak adanya kebocoran pada model, dilakukan tes terapung selama 24 jam di *towing tank*. Model yang sudah jadi kemudian dicat dengan warna kuning dan hijau bertujuan agar warna model kontras dengan warna air seperti Gambar 4.5.

Setelah dimensi utama dari model fisik sudah terpenuhi, distribusi massa dari model fisik juga dimodelkan. Distribusi massa dari SPAR terdapat pada Tabel 4.2. Di dalam lambung model fisik diberi besi ulir dan silinder untuk mengatur distribusi beban dari model fisik dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.5. Tampak depan model fisik (a), Tampak geladak (b) dan *Fairlead* model (c).



Gambar 4.6. Pemberat dan ulir di dalam lambung model fisik.

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan distribusi massa yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Menghitung massa total yang digunakan material model.

Setiap material model yang dipakai ditimbang untuk mendapatkan massa total dari struktur. Pengukuran dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, hasil pengukuran didapat pada Tabel 4.4.

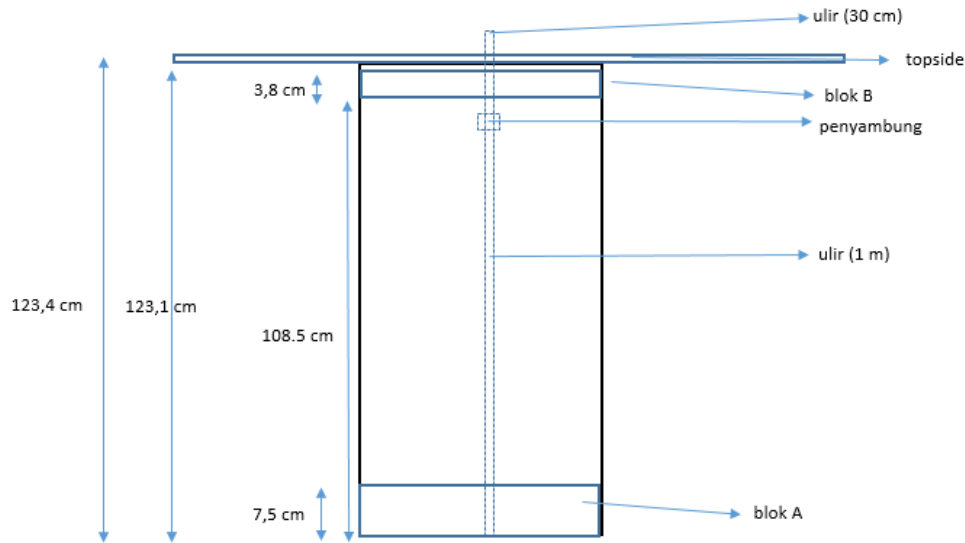
Tabel 4.4. Hasil pengukuran berat material.

Bagian		Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	2	1628.49	1	1628.49
	Ballast 2	2	1623.09	1	1623.09
	Ballast 3	2.5	2094.09	1	2094.09
	Ballast 4	1	663.59	1	663.59
	Cap	0.3	47.46	1	47.46
Blok B	Ballast 5	2.5	2096.69	1	2096.69
	Ballast 6	0.8	466.00	1	466.00
	Ballast 7	0.5	179.49	1	179.49
Topside		0.3	599.50	1	599.50
Tambahan	Ulir (130 cm)		352.09	1	352.09
	Pipa	-	4087.53	1	4087.53
	Penyambung	-		1	0
	Mur	-		2	0
Total					13838.01

2. Distribusi beban untuk pemenuhan jari-jari girasi

Setiap material yang dipakai dihitung momen inersia massanya. Momen inersia massa masing-masing material kemudian digabungkan untuk dicari momen inersia massa total. Momen inersia massa total yang didapat akan dihitung menjadi jari-jari girasi model fisik.

Momen inersia massa dari material tergantung pada masa benda dan bentuk material. Untuk mempermudah perhitungan, model dibagi menjadi beberapa bagian diantaranya pipa PVC, blok A, blok B, topside dan ulir.



Gambar 4.7. Desain pemberat dan ulir.

Perhitungan dari setiap blok adalah:

a. Pipa PVC (Silinder Berongga)

Persamaan 4.1 merupakan persamaan momen inersia massa dari silinder berongga relatif terhadap pusat massanya dengan I_{ox} merupakan momen inersia massa gerakan roll, I_{oy} merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*, m merupakan masa benda, r merupakan jari-jari silinder dan l merupakan panjang silinder.

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (6r^2 + l^2) \quad (4.1)$$

Pipa PVC mempunyai ukuran massa 4088 g, diameter 12.8 cm dan panjang 123.4 cm. Tabel 4.5 menampilkan hasil perhitungan momen inersia masa dari PVC (Silinder berrongga).

Tabel 4.5. Perhitungan momen inersia massa Pipa PVC

	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
Paralon	4087.53	5287070.0	5287070.0

b. Blok A (Lingkaran Pejal)

Blok A terdiri dari material-material yang berbentuk silinder pejal. Persamaan 4.2 digunakan untuk menghitung momen inersia massa dari silinder pejal relatif terhadap pusat massanya dengan I_{ox} merupakan momen inersia massa gerakan *roll*, I_{oy} merupakan momen

inersia massa gerakan *pitch*, m merupakan masa benda, r merupakan jari-jari silinder dan l merupakan panjang silinder.

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (3r^2 + l^2) \quad (4.2)$$

Blok A terdiri dari pemberat berbahan besi dan *cap* berbahan akrilik. Ukuran dan hasil perhitungan material-material di blok A terlampir di Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Perhitungan momen inersia massa Blok A

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
<i>Ballast 1</i>	1628.49	16446.05	16446.05
<i>Ballast 2</i>	1623.09	16391.52	16391.52
<i>Ballast 3</i>	2094.09	20624.60	20624.60
<i>Ballast 4</i>	663.59	6825.99	6825.99
<i>Cap</i>	47.46	471.32	471.32

c. Blok B

Blok B terdiri dari material-material yang berbentuk silinder pejal, sehingga persamaan yang digunakan sama dengan perhitungan blok A (persamaan 4.2).

Blok B hanya terdiri dari pemberat berbahan besi. Ukuran dan hasil perhitungan material-material di blok B terlampir di Tabel 4.7.

Tabel 4.7. Perhitungan momen inersia massa Blok B.

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
<i>Ballast 5</i>	2096.7	20748.49	20748.49
<i>Ballast 6</i>	465.99	4556.90	4556.90
<i>Ballast 7</i>	179.49	1756.57	1756.57

d. Topside

Topside terdiri dari geladak berbahan akrilik. Bentuk dari geladak merupakan balok dengan panjang 40 cm, lebar 40 cm dan tebal 0.3 cm. Persamaan 4.3 digunakan untuk menghitung momen inersia massa dari topside relatif terhadap pusat massanya dengan I_{ox}

merupakan momen inersia massa gerakan *roll*, I_{oy} merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*, m merupakan masa benda, p merupakan panjang balok, l merupakan lebar balok dan t merupakan tebal balok.

$$I_{ox} = \frac{1}{12} m (l^2 + t^2) \quad (4.3a)$$

$$I_{oy} = \frac{1}{12} m (p^2 + t^2) \quad (4.3b)$$

Hasil perhitungan momen inersia massa dari *topside* ditampilkan dalam Tabel 4.8.

Tabel 4.8. Perhitungan momen inersia massa *topside*.

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
Deck	599.5	79937.83	79937.83

e. Ulir

Pemberat akan dimasukkan ke dalam ulir. Ulir merupakan baut yang terbuat dari besi yang mempunyai panjang 1.3 m dengan diameter 8 mm. Karena berbentuk silinder pejal maka Persamaan 4.2 dipakai untuk menghitung momen inersia masa dari ulir.

Hasil perhitungan momen inersia massa dari ulir ditampilkan dalam Tabel 4.9.

Tabel 4.9. Perhitungan momen inersia massa ulir.

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
Ulir	352.09	495873.99	495873.99

Setelah momen inersia massa dari setiap material diketahui, perhitungan momen inersia massa total terhadap pusat masa dilakukan. Langkah pertama untuk mencari momen inersia total tersebut adalah dengan mencari pusat masa dari benda terlebih dahulu. Tabel 4.10 menunjukkan posisi material dengan sumbu 0 di x (centerline), y (midship) dan z (keel). Tabulasi perhitungan pusat masa dapat dilihat di LAMPIRAN. Tabel 4.11 merupakan hasil perhitungan pusat massa model.

Tabel 4.10. Posisi pusat massa dari setiap material yang dipakai.

		Berat (g)	LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
Blok A	<i>Cap</i>	47.46	0.00	0.00	0.15
	Ballast 1	1628.5	0.00	0.00	6.50
	Ballast 2	1623.1	0.00	0.00	4.50
	Ballast 3	2094.1	0.00	0.00	3.0
	Ballast 4	663.59	0.00	0.00	1.25
Blok B	Ballast 5	2096.7	0.00	0.00	109.75
	Ballast 6	465.99	0.00	0.00	111.40
	Ballast 7	179.49	0.00	0.00	112.05
Tambahan	Topside	599.50	0.00	0.00	123.55
	Ulir (130 cm)	352.09	0.00	0.00	65.30
PVC	PVC	4087.53	0.00	0.00	61.70
	Total	13838.01			

Tabel 4.11. Pusat massa model.

LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
0.00	0.00	49.01

Setelah pusat massa dari model diketahui, momen inersia massa relatif terhadap pusat masa dapat dicari. Tabulasi dari perhitungan momen inersia massa terhadap pusat masa terdapat di LAMPIRAN. Jari-jari girasi dapat dicari dengan momen inersia masa yang diketahui, sesuai dengan persamaan 4.4. Tabel 4.12 menampilkan hasil jari-jari girasi dari model.

$$Jari - jari\ girasi = \sqrt{\frac{Inersia\ massa\ total\ gerak\ yang\ ditinjau}{massa\ total\ model}} \quad (4.4)$$

Tabel 4.12. Jari-jari girasi model.

<i>Rxx</i> (cm)	<i>Ryy</i> (cm)
48.47	48.47

Tabel 4.11 dan Tabel 4.12 merupakan nilai target dari pusat massa dan jari-jari girasi dari model fisik. Setelah model dibuat, nilai-nilai tersebut perlu divalidasi pada model yang sudah jadi. Tabel 4.13 di bawah ini merupakan

perbandingan dari distribusi massa hasil skala dengan nilai target hasil perhitungan.

Tabel 4.13. Perbandingan distribusi massa hasil skala dengan hasil perhitungan

Deskripsi	Target		Model Fisik		Error (%)
	Besaran	Satuan	Besaran	Satuan	
Massa Total	13.58	kg	13.838	kg	1.89 %
<i>Keel to Gravity (KG)</i>	49.6	cm	49.01	cm	1.19%
Jari-jari girasi gerak <i>pitch</i>	49.2	cm	48.47	cm	1.48%
Jari-jari girasi gerak <i>roll</i>	49.2	cm	48.47	cm	1.48%

6.2. PEMODELAN TALI TAMBAT

Tali tambat yang digunakan dalam studi eksperimen ini mengacu pada tali tambat pada katalog dari Balmoral Marine (2010) yang berisi properties *mooring equipment* seperti jangkar, rantai, *wire rope* dan lain-lain yang digunakan dalam industri lepas pantai. Pada studi eksperimen ini, data tali tambat yang dijadikan acuan adalah tali *wire rope* dengan data kekakuan.

Dari data di Gambar 4.8, properties *wire rope* yang digunakan adalah *wire rope* dengan kekakuan sebesar 1175 MN. Properties dari *wire rope* yang digunakan dijelaskan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14. Properti *mooring line wire rope*.(Balmoral, 2010)

Diameter	115	mm
Masa jenis (udara)	65	kg/m
Masa jenis (air)	55	kg/m
MBF	11760	kN
Kekakuan	1175	MN

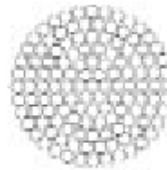
WIRE ROPE

4

ROPE SPECIFICATIONS

SPIRAL STRAND

- Designed to improve service life
- Surface finish: hot dip galvanised
- Sheathing: HDPE yellow colour with longitudinal dark stripe
- Tensile grades of wire optimised to improve wire ductility
- Rope, size, mass and MBF may be customised according to project design requirements
- Supply includes: Quality plan - Fatigue design calculations
Wear design calculation - Corrosion design calculation



4.34

Wire rope dia		Mass (unsheathed)		Mass (sheathed)		Metallic Area mm ²	MBF kN	Stiffness MN	Torque 25% MBF Nm	Turns 25% MBF
Uncoated mm	Sheathed mm	Air kg/m	Sea water kg/m	Air kg/m	Sea water kg/m					
77	91	29	25	32	25	3440	5480	525	750	0.5
83	99	34	29	37	29	4000	6370	610	950	0.5
89	105	39	33	42	33	4600	7330	700	1200	0.4
96	114	46	38	49	38	5350	8530	820	1500	0.4
102	122	51	43	55	43	6040	9360	925	1750	0.4
108	128	58	49	61	48	6770	10490	1035	2100	0.4
115	137	65	55	69	54	7680	11760	1175	2500	0.3
121	145	72	61	76	60	8500	12720	1300	2850	0.3
127	151	80	67	84	66	9370	13930	1435	3300	0.3
134	160	89	75	93	73	10430	15510	1595	3850	0.3
140	168	97	82	101	79	11390	16930	1740	4400	0.3
147	175	107	90	112	88	12550	18660	1920	5100	0.3

All dimensions are approximate

Gambar 4.8. Katalog properties *wire rope*.

Tali tambat yang sudah ditentukan kemudian diskala menjadi dimensi eksperimen. Bahan yang digunakan di sini adalah senar nilon, dapat dilihat pada Gambar 4.9, yang menggunakan bahan nilon, dengan properties yang dijelaskan pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15. Spesifikasi tali tambat eksperimen.

Keterangan	Simbol	Model (tali nilon)	Satuan
Modulus elastisitas	E	2000000000	N/m ²
Diameter tali	D	0.62	mm
Luas Tali	A	0.3019	mm ²
Panjang Tali	L	1.8	m



Gambar 4.9. Bahan tali tambat.

Kemudian, penskalaan dilakukan kembali pada senar pancing sesuai dengan skala model untuk mendapatkan spesifikasi tali tambat yang digunakan pada model fisik. Skala model yang digunakan adalah 1:125, maka dari hasil skala didapatkan properties tali tambat model fisik dijelaskan pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16. Spesifikasi tali tambat model fisik.

Keterangan	Simbol	Model (tali pancing)	Satuan
Modulus elastisitas	E	250000000000	N/m ²
Diameter tali	D	77.50	mm
Luas Tali	A	4717.30	mm ²
Panjang Tali	L	225	m

Dari Tabel 4.16 di atas, kekakuan tali dapat dihitung dengan Persamaan 4.5.

$$\begin{aligned}
 K &= E \times A \\
 K &= 250000 \text{ MN/m}^2 \times 0.00472 \text{ m}^2 \\
 K &= 1179.32 \text{ MN}
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Validasi dilakukan dengan membandingkan kekakuan *wire rope* yang ada pada katalog Balmoral Marine (2010) dengan senar. Perbandingan keduanya terlampir pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17. Perbandingan kekakuan *prototype* dengan data kekakuan *wire rope* acuan.

<i>Stiffness</i> model asli (MN)	<i>Stiffness wire rope</i> acuan (MN)	Error (%)
1179.32	1175	0,37

Dari perbandingan kekakuan pada Tabel 4.17, didapatkan persentase error yang terjadi sebesar 0,368 % memenuhi syarat dari validasi (<5%). Sehingga untuk analisa eksperimen, numerik dan analitis data properties tali tambat ditunjukkan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18. Data properties tali tambat yang digunakan pada model fisik

	Model fisik	Full Scale	Satuan
Length	1.8	225	m
Diameter	0.62	115	mm
Axial Stiffness (EA)	0.604	1175000	KN

6.3. VALIDASI MODEL

6.3.1. Validasi Model Numerik

Model yang dibuat di MOSES dapat dilihat parameter hidrostatiknya dan distribusi massanya. Parameter ini yang akan digunakan untuk memvalidasi model fisik, sehingga bisa dilakukan analisa. Pada penelitian ini batas maksimum error yang diijinkan adalah 5 %. Tabel 4.19 menampilkan perbandingan antara model numerik dan data. Berdasar Tabel 4.19 maka model numerik yang dibuat di MOSES bisa dilanjutkan untuk analisa gerak dan tali tambat.

Tabel 4.19. Perbandingan dan validasi model numerik dengan data

	Prototype		Model Numerik		Error (%)
Diameter	16.00	m	16.00	m	0.00
Draft	135.03	m	135.03	m	0.00
Length	154.23	m	154.23	m	0.00
Fairlead depth	12.74	m	12.74	m	0.00
Weight	26531524.91	kg	27117650	kg	2.21
KG	62.03	m	62.03	m	0.00
Roll Gyration	61.48	m	61.48	m	0.00
Pitch Gyration	61.48	m	61.48	m	0.00
Mooring Diameter			115	mm	
Mooring Stiffness (EA)			1175	MN	

6.3.2. Validasi Model Eksperimen

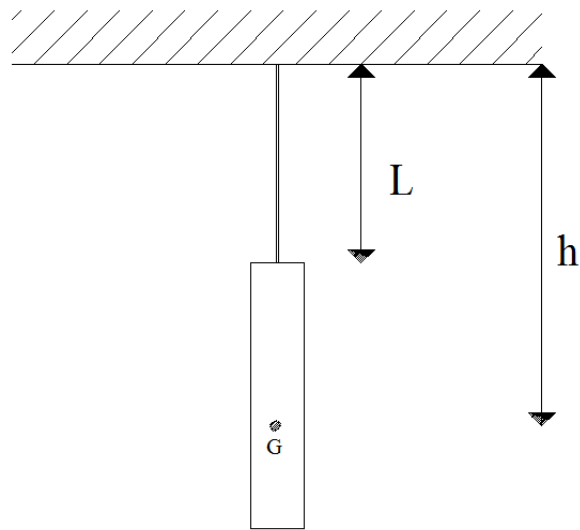
Setelah melakukan proses perencanaan, model fisik yang sudah dibuat dilakukan validasi. Validasi diperlukan karena pada pembuatan, selain material utama yang dipakai, pada model juga terdapat material pendukung seperti lem, dempul, resin dan sebagainya. Proses ini dilakukan sebagai berikut:

1. Massa Total

Perhitungan massa total dilakukan dengan melihat sarat yang dimiliki struktur ketika keadaan terapung. Berdasar pengamatan yang didapat sarat model fisik adalah sebesar 108.5 cm. Dengan sarat dan diameter lambung yang diketahui, maka berat model dapat dihitung sebagai perkalian antara volume tercelup dan massa jenis air, sehingga didapat displacement model sebesar 13.90 kg.

2. Jarak KG dan Jari-jari Girasi

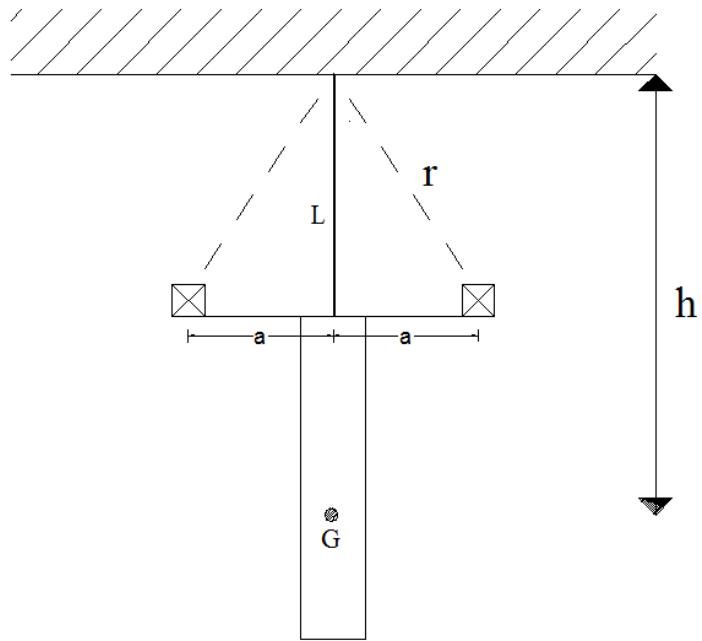
Jarak KG dan jari-jari girasi pada struktur dihitung dengan melakukan tes pendulum pada struktur. Tes pendulum merupakan tes mengayunkan model dan menghitung periode dari ayunan struktur. Tes dilakukan dengan dua kondisi, kondisi 1 merupakan kondisi model tanpa massa tambahan, sedangkan kondisi 2 merupakan kondisi model dan pemberat pada jarak tertentu. Pemberat yang dipakai merupakan plastisin yang telah dihitung beratnya di Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Kelautan. Pada setiap kondisi dicatat periode ayunannya. Periode yang didapat kemudian digunakan untuk mencari KG dan jari-jari girasi. Skenario tes pendulum untuk kondisi 1 dan kondisi 2 dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11. Ukuran-ukuran yang dipakai untuk tes pendulum terdapat pada Tabel 4.20 berikut ini.



Gambar 4.10. Skenario tes pendulum kondisi 1 untuk perhitungan jari-jari girasi.



Gambar 4.11. Tes pendulum kondisi 1.



Gambar 4.12. Skenario tes pendulum kondisi 2 untuk perhitungan jari-jari girasi.



Gambar 4.13. Tes pendulum kondisi 2.

Tabel 4.20. Ukuran – ukuran yang digunakan pada pendulum test

1.	Berat Model (m)	13.90	kg
2.	Percepatan gravitasi (g)	9.81	m/s ²
3.	Jarak massa tambah (a)	0.153	m (dari titik pusat model)
4.	Berat massa tambah (m _a)	1.52	kg
5.	Panjang tali (L)	2.36	m
6.	Panjang tali terhadap jarak massa tambah (r)	2.37	m

Tes pendulum dilakukan sebanyak 50 kali. Hasil pengukuran dari periode gerak pendulum model fisik pada kondisi 1 dan kondisi 2 disajikan dalam LAMPIRAN. Rata-rata periode yang didapat ditampilkan dalam Tabel 4.21.

Tabel 4.21. Periode dan frekuensi gerak pendulum model fisik kondisi 1 dan 2

1.	Periode gerak tanpa massa tambah (T ₀)	3.502	detik
2.	Periode gerak dengan masa tambah (T ₁)	3.540	detik
3.	Frekuensi tanpa massa tambah (ω ₀)	1.794	rad/s
4.	Frekuensi dengan massa tambah (ω ₁)	1.775	rad/s

Dari data-data pada Tabel 4.21 dapat ditentukan jarak dari titik tumpuan tali ke titik berat model (h) dengan menggunakan persamaan 4.7.

$$h = \frac{2m(r^2\omega_1^2 - Lg)}{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2\right] Mg} \quad (4.7)$$

$$h = 2.964 \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan diatas, dapat diketahui titik berat model adalah sebagai berikut :

$$KG = h - l - \text{panjang ulir sisa} - \text{tali pengait di ulir}$$

$$KG = 296.4 - 236 - (130-123.4) - 3.8KG = 85.32 - 6.6 - 4.2$$

$$KG = 50.25 \text{ cm dari keel}$$

Dari hasil perhitungan di atas, dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model fisik terhadap titik gantung dengan persamaan 4.8.

$$I_{44} = I_{55} = \frac{mgh}{\omega_o^2} \quad (4.8)$$

$$I_{44} = I_{55} = \mathbf{125.58 \text{ kg.m}^2}$$

Kemudian dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model relatif terhadap titik berat dengan Persamaan 4.9.

$$I_m = I - mh^2 \quad (4.9)$$

$$I_m = \mathbf{3.47 \text{ kgm}^2}$$

Nilai momen inersia yang diketahui dapat digunakan untuk mencari jari-jari girasi sesuai dengan Persamaan 4.10.

$$Radius \text{ girasi} = \sqrt{\frac{I_m}{m}} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{Radius \text{ girasi} = 0.4993 \text{ m}}$$

Karena massa terdistribusi merata relatif terhadap sumbu z, maka radius girasi *pitch* dan *roll* adalah identik dengan nilai 49.93 cm.

Tabel 4.22 menunjukkan perbandingan parameter model antara *prototype*, target dan model fisik. Model fisik valid apabila error yang terukur kurang dari 5%.

Tabel 4.22. Validasi model fisik.

	Data		Konversi	Target		Achieved		Error
Diameter	16.00	M	125	12.80	cm	12.80	cm	0.0%
Draft	135.03	M	125	108.00	cm	108.00	cm	0.0%
Length	154.23	M	125	123.4	cm	123.40	cm	0.0%
Fairlead Depth	12.74	M	125	10.2	cm	10.20	cm	0.0%
Weight	26531524.91	Kg	1953125	13.58	kg	13.90	kg	1.91%
KG	62.03	M	125	49.6	cm	50.25	cm	1.31%
Roll Gyrase	61.48	M	125	49.2	cm	49.93	cm	1.48%
Pitch Girasi	61.48	M	125	49.2	cm	49.93	cm	1.48%
Mooring Diameter						0.62	mm	
	-							-
EA (Stiffness)						1175	MN	-

6.4. INSTRUMEN PENGUKURAN

Pada studi eksperimen diperlukan instrumen untuk mengukur gerak dan tegangan tali dari model fisik. Pengukuran gerak menggunakan *gyroscope* dan *image processing*, sedangkan pengukuran tegangan tali menggunakan instrumen *loadcell*. Sebelum dilakukan pengukuran, ketiga instrumen ini perlu dilakukan kalibrasi.

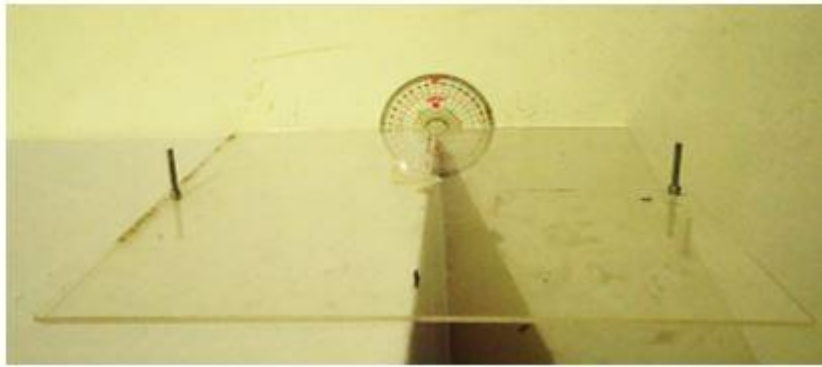
6.4.1. Kalibrasi Gyroscope

Gerak rotasional sumbu y (*pitch*) dari model SPAR diukur menggunakan *gyroscope*. Instrumen *gyroscope* yang digunakan adalah *gyroscope* MPU 6050 GY87. Instrumen ini mampu mengukur sudut yang dibentuk oleh MPU 6050. Pada MPU 6050 terdapat sumbu orientasi x, y dan z sebagai orientasi nilai yang dihasilkan keluaran dari MPU 6050. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh *microcontroller* Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam angka-angka digital.

Instrumen *gyroscope* (Gambar 4.14) diletakkan pada bagian geladak (Gambar 4.15) pada model fisik yang berbentuk persegi dengan bahan akrilik.



Gambar 4.14. Instrumen *gyroscope*.



Gambar 4.15 geladak dan busur.

Gerakan *pitch* dari SPAR diukur dengan menggunakan *gyroscope*. Untuk program pembacaan *gyroscope* menggunakan *library* yang tersedia di internet dengan modifikasi minor untuk *data logging* ke excel. Program ini menghasilkan keluaran berupa angka-angka dengan format sebagai berikut: DATA, TIME, <WAKTU>, <YAW>, <FILTERED YAW>, <PITCH>, <FILTERED PITCH>, <ROLL>, <FILTERED ROLL>, <LC1>, <LC2>, <LC3>, <LC4>.

Kalibrasi *gyroscope* dilakukan untuk menyesuaikan nilai keluaran dari sensor dengan nilai sudut yang terjadi (Gambar 4.16). Angka yang perlu dilihat dari keluaran *gyroscope* adalah angka pada <FR> (*Filtered Roll*) (Gambar 4.17). Kalibrasi dilakukan dengan mengukur sudut 0°, 10°, 30°, 40°, 50°, dan 60° di atas meja dengan bantuan busur (Gambar 4.18). Proses ini dilakukan dengan dua arah pengukuran yaitu searah dan berlawanan jarum jam relatif terhadap *gyroscope*.



Gambar 4.16. *Gyroscope* pada geladak model fisik.

COM4 (Arduino/Genuino Uno)

```

DATA, TIME, 89317, 49.20, 49.21, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 89405, 49.20, 49.21, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 89493, 49.20, 49.21, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 89592, 49.19, 49.21, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 89668, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 89756, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 89844, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 89932, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.61, 0.61, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90020, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.61, 0.61, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90117, 49.20, 49.20, -1.84, -1.85, 0.61, 0.61, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90195, 49.20, 49.20, -1.85, -1.85, 0.51, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90284, 49.20, 49.20, -1.85, -1.85, 0.51, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90372, 49.20, 49.20, -1.85, -1.85, 0.51, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90460, 49.20, 49.20, -1.85, -1.85, 0.51, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90548, 49.20, 49.20, -1.85, -1.85, 0.51, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90642, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90723, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90811, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90899, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 90987, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 91074, 49.19, 49.20, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 91166, 49.18, 49.20, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 91250, 49.18, 49.19, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.03, 0.00
DATA, TIME, 91338, 49.19, 49.19, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91426, 49.19, 49.19, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91514, 49.18, 49.19, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91617, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91689, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91778, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91866, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 91954, 49.18, 49.19, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92042, 49.18, 49.19, -1.85, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92141, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.61, 0.60, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92217, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.61, 0.61, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92305, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.61, 0.61, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92393, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.61, 0.61, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92481, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.61, 0.61, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00
DATA, TIME, 92568, 49.18, 49.19, -1.84, -1.85, 0.61, 0.61, 0.00, 0.00, 0.02, 0.00

```

☐ Autoscroll

Gambar 4.17. Keluaran Arduino pada sudut 0° searah jarum jam.



Gambar 4.18. *Gyroscope* dan geladak saat proses kalibrasi.

Tabel 4.23 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran *gyroscope* saat *gyroscope* diputar searah jarum jam. Tabel 4.24 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran *gyroscope* diputar berlawanan arah jarum jam.

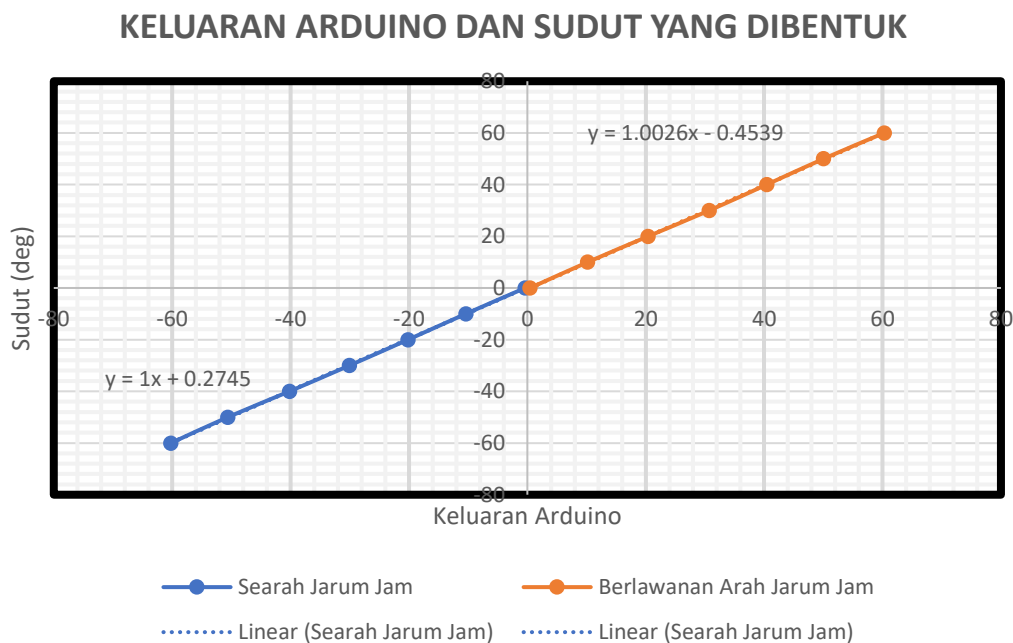
Tabel 4.23. Kalibrasi searah jarum jam.

Sudut (deg)	Keluaran Gyroscope (satuan)
0°	-0.37
10°	-10.38
20°	-20.14
30°	-30.05
40°	-40.18
50°	-50.61
60°	-60.20

Tabel 4.24. Kalibrasi berlawanan jarum jam.

Sudut (deg)	Output Giro (satuan)
0°	0.60
10°	10.20
20°	20.42
30°	30.75
40°	40.44
50°	50.05
60°	60.30

Nilai pada Tabel 4.23 dan Tabel 4.24 dapat dibuat grafik seperti Gambar 4.19. Berdasarkan hasil kalibrasi *gyroscope* yang dilakukan, keluaran yang dihasilkan oleh Arduino mempunyai persamaan sesuai Tabel 4.25. Hal ini menunjukkan keluaran yang dikeluarkan merupakan sudut yang dibentuk dengan nilai positif menunjukkan berlawanan jarum jam dan negatif searah jarum jam. Kalibrasi dilakukan antara sudut 0° hingga 60° searah dan berlawanan arah jarum jam karena gerakan SPAR diasumsikan tidak akan bergerak *pitch* lebih dari 60°. Selain itu, validasi dilakukan dengan interval sudut sebesar 10° sehingga dapat diketahui apakah sensor dapat membaca mendekati hasil sebenarnya. Keluaran yang dihasilkan memiliki hubungan secara linier yang dapat disimpulkan bahwa sensor terkalibrasi untuk digunakan pada studi eksperimen kali ini.



Gambar 4.19. Keluaran Arduino dengan sudut yang dibentuk.

Tabel 4.25. Persamaan *trendline* Arduino.

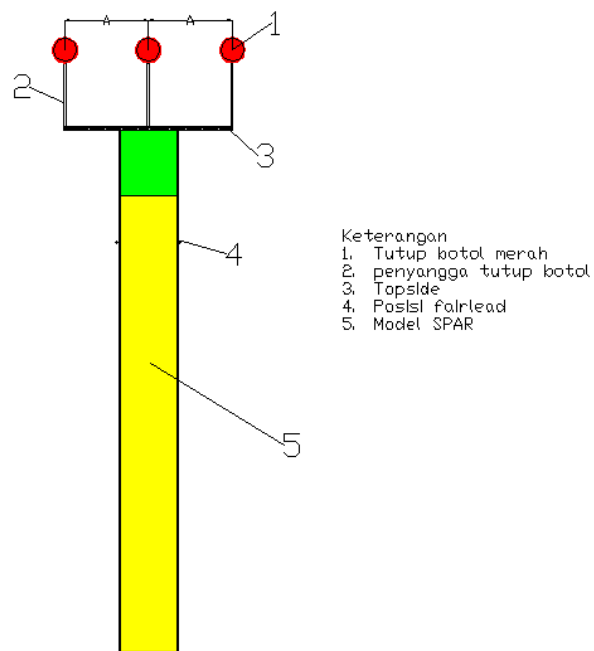
Searah Jarum Jam	$y=1.00x-0.45$
Berlawanan Arah Jarum Jam	$y=1.00x+0.27$

6.4.2. Kalibrasi Image Processing

Digital image processing adalah proses pengolahan gambar dua dimensi oleh perangkat komputer. *Digital image processing* merupakan proses pengambilan atribut-atribut pada gambar. Pada penelitian ini, *Digital image Processing* dimanfaatkan untuk pendeteksian objek pada video yang digunakan untuk merekam gerakan translasi naik-turun (*heave*) dan kanan-kiri (*surge*) yang terjadi pada objek berupa model SPAR yang mengapung di dalam air dan terkena gelombang dengan variasi periode gelombang.

Dalam proses representasi dan pemodelan, kuantitas dan karakter dari *pixel* menggambarkan suatu objek. *Pixel* merupakan satuan titik kecil yang menyusun sebuah gambar. Setiap *pixel* pada gambar menyimpan informasi warna. Banyaknya *pixel* yang menyusun suatu gambar tergantung pada resolusi gambar.

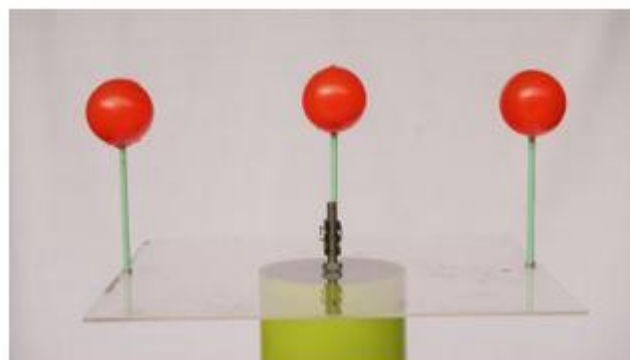
Pada penelitian ini, dipasang tiga buah bola berwarna merah pada model fisik yang terapung di air yang digunakan untuk merekam gerak pada objek. Warna merah dipilih untuk mendapatkan kontras warna pada gambar yang direkam. Selain itu bentuk lingkaran juga lebih mudah dibedakan oleh program. Objek yang ditinjau adalah bola yang berada di titik pusat model sedangkan bola yang diletakkan di ujung model digunakan untuk perhitungan skala *pixel* dan validasi data yang dihasilkan. Proses *image processing* ini dilakukan dengan menggunakan satu buah kamera webcam logitech c270 yang merekam gambar kemudian diolah menggunakan bantuan perangkat lunak visual basic C++.



Gambar 4.20. Sketsa model fisik dalam *Image Processing*.



Gambar 4.21. Kamera dan bola yang ditinjau.



Gambar 4.22. Konfigurasi geladak dengan objek yang ditinjau.

Langkah-langkah yang digunakan dalam menganalisa *image processing* ini adalah sebagai berikut:

1. *Input Video*

Input video dilakukan dengan menggunakan kamera *real time* yang menggunakan lensa *fixed focus*. Kamera yang digunakan adalah webcam logitech c270 dengan kualitas gambar 3 MP dan *high definition video* HD 720p.



Gambar 4.23. Webcam Logitech c270 dengan lensa *fixed focus*.

2. *Pemisahan Frame*

Langkah selanjutnya, perlu dilakukan konversi dari data *input video real time* yang direkam menjadi kumpulan data *frame* menggunakan bantuan perangkat lunak *visual basic C++* dengan sistem operasi berbasis Linux. Kombinasi dari data-data *frame* dinamakan video. Setiap video mempunyai banyak jumlah *frame*, data ini nantinya yang akan diambil dan diolah untuk analisa gerakan pada model.

3. *Current image* dan *background image*

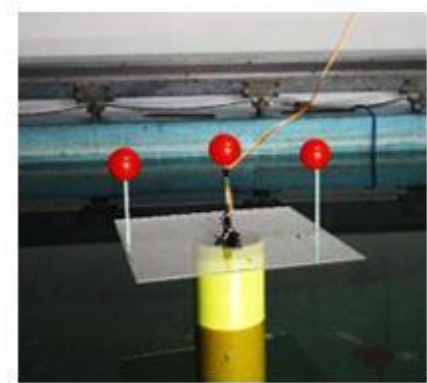
Setelah mengkonversi video menjadi data *frame*, Gambar *frame* pertama yang dihasilkan dinamakan *background image* sedangkan untuk gambar selain gambar pertama dinamakan *current images*.

4. *Background subtraction*

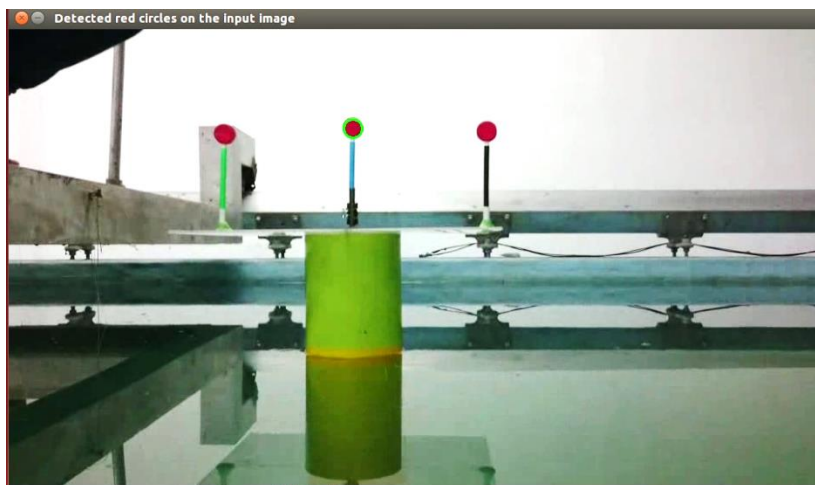
Background subtraction artinya pada tahap ini dilakukan pengurangan dari *current image* dan *background image*. *Current image* diperbarui setiap waktu perekaman sedangkan untuk *background image* tetap

konstan menggunakan gambar pada *frame* awal. Dengan menggunakan teknik ini dapat diketahui besar perpindahan objek.

Gambar 4.24 merupakan contoh uji *image processing* yang dilakukan untuk merekam gerakan. Warna merah akan ditangkap oleh sistem *image processing* seperti pada Gambar 4.25. Keluaran dari gerakan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.26 dan 4.27.



Gambar 4.24. Model fisik dengan bola merah yang digunakan dalam analisa gerak model menggunakan *image processing*.



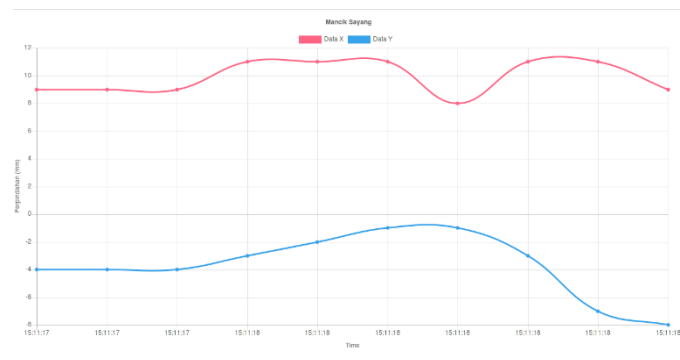
Gambar 4.25. *Background image* yang digunakan sebagai gambar acuan.

```

2017-4-3;15:5:7;1 x
2017-4-3;15:5:7;4109;-1209
2017-4-3;15:5:7;0;0
2017-4-3;15:5:7;0;0
2017-4-3;15:5:7;0;0
2017-4-3;15:5:7;0;0
2017-4-3;15:5:7;0;0
2017-4-3;15:5:7;1;-2
2017-4-3;15:5:7;0;-1
2017-4-3;15:5:7;1;-2
2017-4-3;15:5:7;1;-4
2017-4-3;15:5:7;2;-4
2017-4-3;15:5:7;2;-4
2017-4-3;15:5:7;1;-6
2017-4-3;15:5:7;2;-8
2017-4-3;15:5:7;3;-9
2017-4-3;15:5:7;2;-9
2017-4-3;15:5:8;3;-12
2017-4-3;15:5:8;2;-13
2017-4-3;15:5:8;3;-16
2017-4-3;15:5:8;4;-16
2017-4-3;15:5:8;4;-17
2017-4-3;15:5:8;4;-16
2017-4-3;15:5:8;4;-17
2017-4-3;15:5:8;7;-18
2017-4-3;15:5:8;7;-17
2017-4-3;15:5:8;7;-17
2017-4-3;15:5:8;7;-17
2017-4-3;15:5:8;7;-16
2017-4-3;15:5:8;8;-14
2017-4-3;15:5:8;7;-14
2017-4-3;15:5:9;8;-13
2017-4-3;15:5:9;7;-12
2017-4-3;15:5:9;7;-11
2017-4-3;15:5:9;8;-9
2017-4-3;15:5:9;9;-8
2017-4-3;15:5:9;8;-4
2017-4-3;15:5:9;8;-3

```

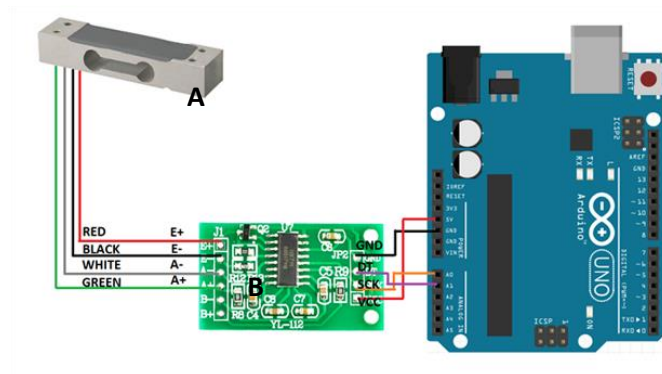
Gambar 4.26. Keluaran datalog dari data *frame* yang dihasilkan.



Gambar 4.27. Keluaran grafik dari data *frame* yang dihasilkan untuk gerakan *heave* dan *surge*.

6.4.3. Kalibrasi *Load Cell*

Tegangan tali diukur menggunakan instrumen *Load Cell*. Instrumen ini memanfaatkan *strain-gauge* yang terpasang pada *load cell*. Jika *load cell* mengalami tarikan maka *strain-gauge* akan mengalami perubahan bentuk. Perubahan bentuk ini akan menghasilkan perubahan tegangan. Tegangan ini kemudian diamplifikasi menggunakan modul elektronik HX711 agar dapat terbaca. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh *microcontroller* Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam bentuk angka-angka digital.

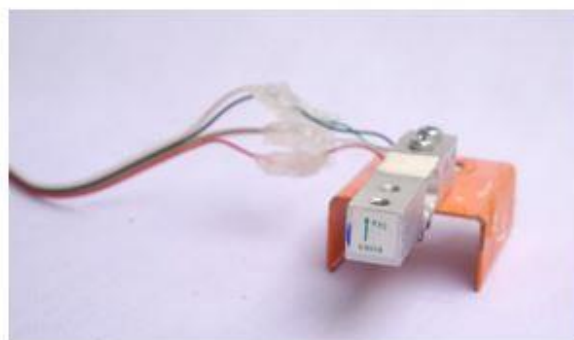


Gambar 4.28. Konfigurasi *Load Cell* (A), HX711 (B) dan Arduino UNO (C)
(Layad Circuit, 2010)

Pada studi eksperimen, 4 *load cell* digunakan untuk mengukur tegangan tali dari 4 tali tambat, sehingga diperlukan 4 HX711 (*amplifier*) dan 4 *channel* dari 1 Arduino UNO. Arduino merupakan *platform open source* sehingga program dapat diunduh dengan mudah. Untuk pembacaan *load cell* digunakan program milik Jeff Rowberg (2012) dengan modifikasi minor untuk *data logging* ke excel. Program ini akan menampilkan angka-angka dengan format sebagai berikut:

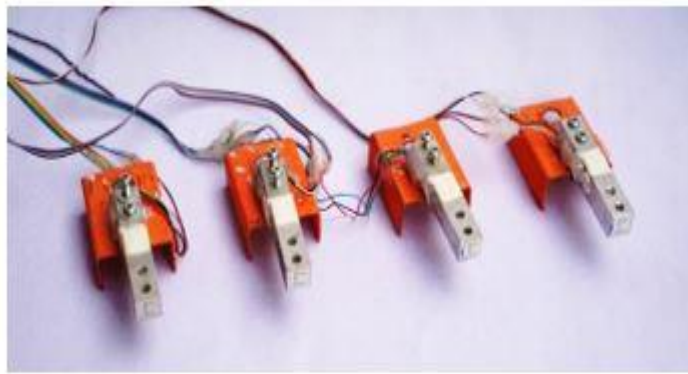
DATA, TIME, <WAKTU>, <YAW>, <COMPUTED YAW>, <PITCH>,
<COMPUTED PITCH>, <ROLL>, <COMPUTED ROLL>, <LC1>, <LC2>,
<LC3>, <LC4>

Instrumen *load cell* yang digunakan pada studi eksperimen ini adalah *load cell* dengan kapasitas beban maksimum 5kg. *Load Cell* akan berfungsi jika beban mempunyai arah sesuai arah kerja *load cell* (Gambar 4.29). Eksperimen ini menggunakan 4 buah *load cell* (Gambar 4.30).



Gambar 4.29. Instrumen *Load Cell* dan arah beban.

Untuk keperluan kalibrasi *Load Cell*, angka yang perlu dilihat adalah angka pada kolom <LC1> (*Load Cell 1*), <LC2> (*Load Cell 2*), <LC3> (*Load Cell 3*), dan <LC4> (*Load Cell 4*). Angka digital yang ditampilkan oleh laptop perlu dikalibrasi sehingga dapat diketahui nilai yang sesungguhnya. Kalibrasi dilakukan dengan menimbang beberapa beban terukur sehingga dapat dicari regresi linear dari nilai-nilai yang keluar. Pada kalibrasi ini digunakan 5 buah beban, 1000 gram, 500 gram, 200 gram, 100 gram dan 50 gram (Gambar 4.31). Beban yang digunakan untuk pengukuran merupakan besi timbangan yang ada dipasaran. Besi timbangan juga sudah diukur ulang di Laboratorium Mekanika Tanah menggunakan timbangan elektronik dan menunjukkan nilai ± 1 gram.



Gambar 4.30. Keempat *Load Cell* yang digunakan.

Besi timbangan ditali dan digantungkan di sisi pengukuran *load cell*. Pada layar akan terlihat keluaran angka. Kemudian, setelah diberikan beban, angka yang muncul tersebut diolah untuk dicari regresi linear kalibrasi *load cell*. Setiap *load cell* akan diuji 2 kali untuk menemukan persamaan regresi linear dari setiap *load cell*.



Gambar 4.31. Beban Kalibrasi 1000 g (A), 500 g (B), 200 g (C), 100 g (D) dan 50 g (E).

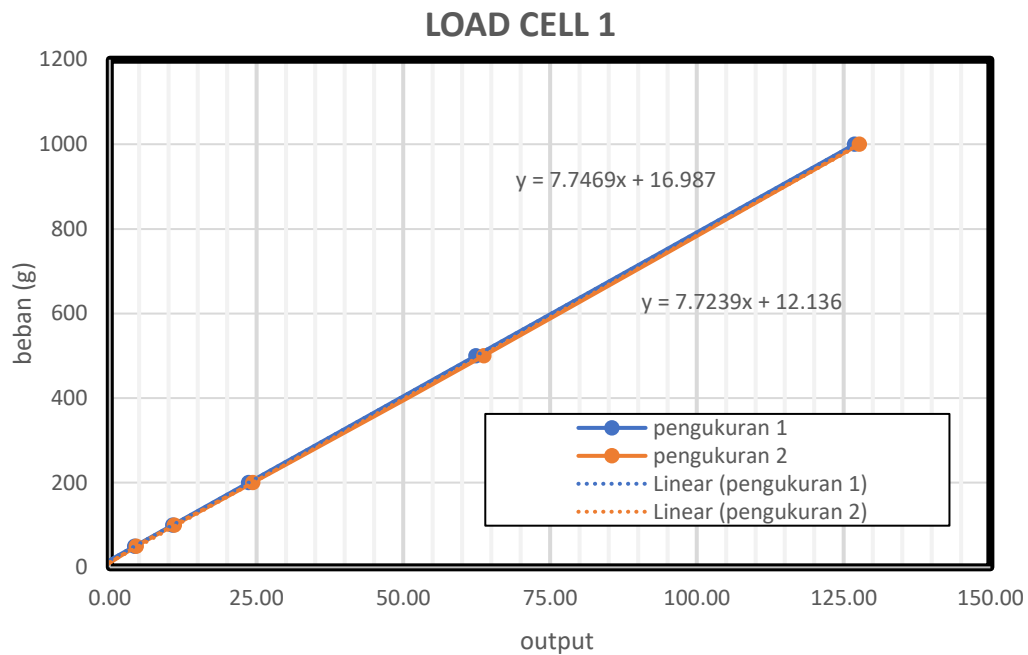
Data yang ditunjukkan dari proses kalibrasi dengan 5 timbangan pada setiap *load cell* dengan 2 percobaan yang berbeda.

- *Load Cell 1*

Tabel 4.26. Data kalibrasi *load cell* 1 percobaan 1 dan 2.

Beban (g)	Output 1 ()	Output 2 ()
1000	126.9	127.7
500	62.4	63.7
200	23.6	24.3
100	10.7	11.0
50	4.3	4.5
0	0	0

Data pada Tabel 4.26 kemudian di-*plot* menjadi Gambar 4.32. Gambar 4.32 menunjukkan *Load Cell* 1 mempunyai persamaan linier. sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.



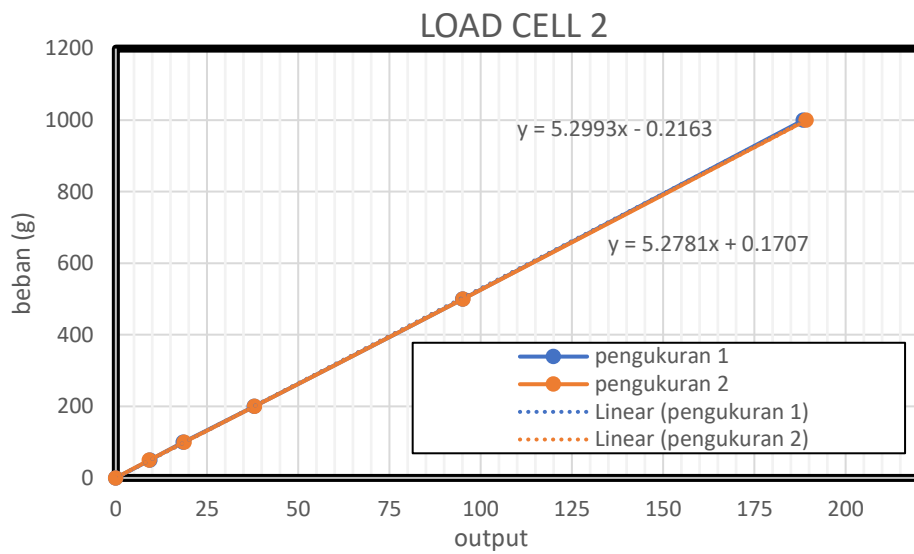
Gambar 4.32. Grafik kalibrasi *Load Cell 1*.

- *Load Cell 2*

Tabel 4.27. Data kalibrasi *load cell 2* percobaan 1 dan 2.

Beban (g)	Output 1 (\circ)	Output 2 (\circ)
1000	188.4	189.2
500	95.1	95.15
200	37.95	38.02
100	18.5	18.72
50	9.4	9.22
0	0	0

Data pada Tabel 4.27 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.33. Gambar 4.33 menunjukkan *Load Cell 2* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.



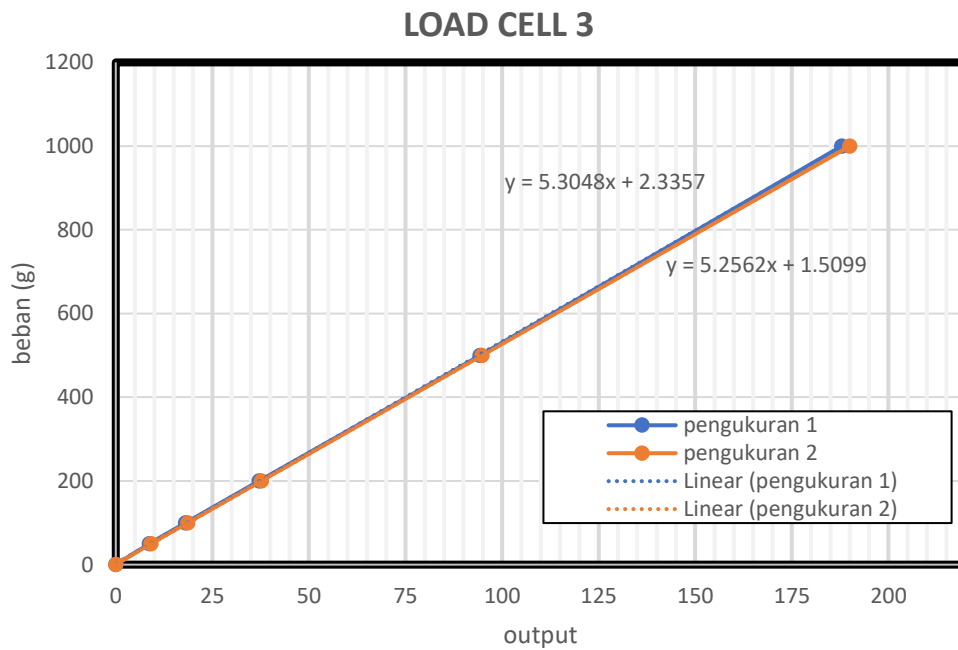
Gambar 4.33. Grafik kalibrasi *Load Cell 2*.

- Load Cell 3

Tabel 4.28. Data kalibrasi *load cell 3* percobaan 1 dan 2.

Beban (g)	Output 1 ()	Output 2 ()
1000	187.9	190.0
500	94.3	94.8
200	37.1	37.7
100	18.1	18.6
50	8.7	9.1
0	0	0

Data pada Tabel 4.28 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.34. Gambar 4.34 menunjukkan *Load Cell 3* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.



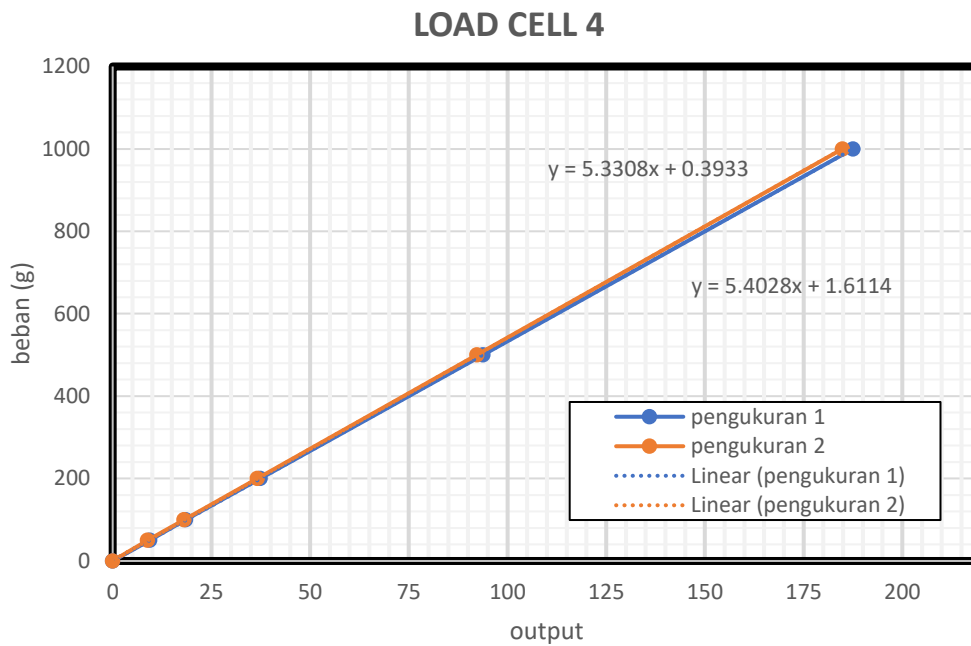
Gambar 4.34. Grafik kalibrasi *Load Cell 3*.

- *Load Cell 4*

Tabel 4.29. Data kalibrasi *load cell 4* percobaan 1 dan 2.

Beban (g)	Output 1 ()	Output 2 ()
1000	187.5	184.8
500	93.8	92.2
200	37.4	36.6
100	18.5	18.1
50	9.4	8.8
0	0	0

Data pada Tabel 4.29 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.35. Gambar 4.35 menunjukkan *Load Cell 4* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.



Gambar 4.35. Grafik kalibrasi Load Cell 4

Persamaan yang digunakan untuk mengkalibrasi keluaran *load cell* ditampilkan dalam Tabel 4.30.

Tabel 4.30. Persamaan Kalibrasi Keluaran Load Cell dengan Beban.

LOAD CELL 1	$y = 7.72x + 12.12$
LOAD CELL 2	$y = 5.28x + 0.17$
LOAD CELL 3	$y = 5.26x + 1.51$
LOAD CELL 4	$y = 5.40x + 1.61$

Persamaan loadcell pada tabel 4.30 diatas digunakan dalam menentukan seberapa besar tension tali yang terjadi dengan variabel x merupakan output dari loadcell dan variabel y merupakan beban yang terjadi.

6.5. RAO TERAPUNG BEBAS

6.5.1. Metode Analitis

6.5.1.1. Mode Gerak Surge

Gerak Surge dari sebuah SPAR dapat dihitung secara analitis dengan menghitung *mass displacement* dari SPAR pada sarat yang direncanakan. Kemudian, parameter-parameter dinamis benda juga dicari seperti massa tambah, redaman dan kekakuan struktur. Setelah semua diketahui, respon gerak bangunan apung dapat dikalkulasi.

1. Perhitungan *displacement*

Displacement prototype berdiameter (D) 16 m yang tercelup dengan sarat (T) 135,03 m di laut dengan massa jenis (ρ) 1.025 kg/m³ dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.11

$$\Delta = \frac{1}{4} \pi D^2 T \rho \quad (4.11)$$

Tabel 4.31. menampilkan hasil perhitungan *displacement* dan perbandingannya dengan data JIP dan analisa numerik (MOSES).

Tabel 4.31. Perbandingan *displacement* dari hasil data, analitik dan numerik.

	DATA	ANALITIK	ERROR	NUMERIK	ERROR
MASSA (kg)	26531524.91	27834342.56	4.91%	27117650	2.21%

2. Massa Tambah

Massa tambah dari mode gerak *surge* untuk bentuk silinder berdasarkan Sarpkaya (2010) ditampilkan dalam Persamaan 4.12 dengan massa jenis (ρ) 1.025 kg/m³ dan c jari-jari silinder 8 m. Hasil perhitungan terlampir di Tabel 4.32.

$$m_a = \rho \pi c^2 \quad (4.12)$$

3. Kekakuan

Pada mode gerak *surge*, benda terapung tidak mempunyai kekakuan, sehingga kekakuan mode gerak *surge* adalah 0

4. Redaman

Pada studi analitis kali ini, redaman (*damping*) dari struktur pada mode gerak surge merupakan 0 untuk penyederhanaan perhitungan.

5. Gaya Eksitasi

Perhitungan gaya eksitasi gelombang menggunakan perhitungan Morrison seperti Persamaan 4.13. Bangunan SPAR berbentuk silinder dengan jari-jari (R) sebesar 8 m, koefisien Morrison (C_m) bernilai 1, panjang silinder tercelutp (d) bernilai 108 m.

$$F_e = (1 + C_m)\rho\pi R^2\zeta_0 g(1 - e^{-kd}) \cos(kx - \omega t) \quad (4.13)$$

6. RAO

Parameter-parameter dinamis dari sistem terapung yang sudah diketahui dapat dilihat di Tabel 4.32.

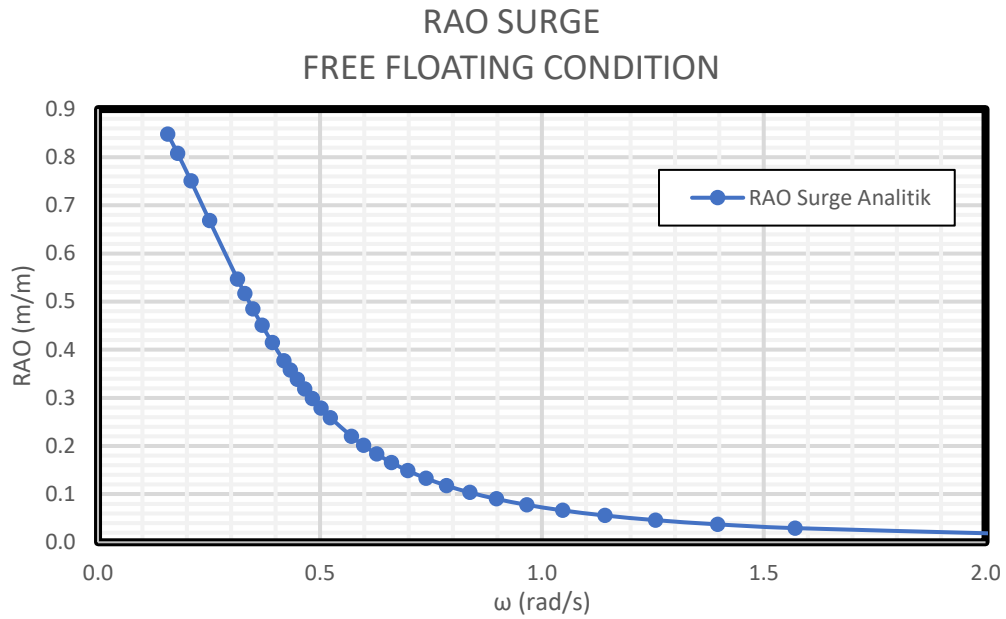
Tabel 4.32. Parameter Perhitungan RAO gerak *surge*.

	BESARAN	SATUAN
Displacement (m)	27834342.56	kg
Masa Tambah (ma)	206140.00	Kg/m
Kekakuan (k)	0	N/m
Damping (b)	0	Ns/m

Persamaan 4.14 merupakan persamaan respon gerak bangunan. Nilai respon gerak bangunan apung akan sama dengan RAO jika dalam perhitungan amplitudo gelombang adalah 1 m.

$$\zeta_{x0} = \frac{F_e}{\sqrt{\{k_x - (m + a_x)\omega^2\}^2 + (b_x\omega)^2}} \quad (4.14)$$

Tabulasi perhitungan RAO dapat dilihat di LAMPIRAN dengan sumbu absis sebagai frekuensi gelombang dan koordinat sebagai RAO. Gambar 4.36 menampilkan grafik RAO untuk gerak *surge*.



Gambar 4.36. Grafik RAO *surge* analitis

6.5.1.2. Mode Gerak Heave

Pada mode gerak *heave* parameter dinamisnya berbeda, yaitu massa tambah, kekakuan benda, damping dan gaya eksitasinya.

1. Perhitungan *displacement*

Displacement SPAR dalam mode gerak *heave* sama dengan dalam mode gerak *surge* sehingga, nilai *displacement* yang digunakan seperti Tabel 4.31.

2. Massa Tambah

Massa tambah dari mode gerak *heave* untuk bentuk silinder berdasarkan Sarpkaya (2010) ditampilkan dalam persamaan 4.15, dengan massa jenis (ρ) 1.025 kg/m³ dan c jari-jari silinder 8 m. Namun, pada kasus SPAR permukaan yang tercelup merupakan setengah bagian, sehingga massa tambah SPAR menjadi 1/2 ma. Hasil perhitungan terlampir di Tabel 4.33.

$$m_a = \frac{8}{3} \rho c^3 \quad (4.15)$$

3. Kekakuan

Pada mode gerak *heave* kekakuan struktur dapat dihitung dengan persamaan 4.16, dengan massa jenis (ρ) 1.025 kg/m³, percepatan

gravitasi (g) 9.81 m/s^2 dan A_w merupakan luas bidang air (*Water Plane Area*, WPA). SPAR mempunyai luas bidang air berbentuk lingkaran sehingga besar kekakuan gerak *heave* dilampirkan dalam Tabel 4.33.

$$k_{33} = \rho g A_w \quad (4.16)$$

4. Damping

Pada studi analitis kali ini, damping dari struktur pada mode gerak *heave* digunakan nilai 0 untuk penyederhanaan perhitungan. Nilai damping 0 akan menghasilkan nilai tak terhingga pada frekuensi naturalnya. Untuk menyiasati hal tersebut, pada saat melakukan tabulasi, frekuensi tabulasinya tidak pas saat frekuensi natural benda. Hasil yang didapat menunjukkan tendensi yang sama dengan perhitungan numerik MOSES.

5. Gaya Eksitasi

Menurut Journee (2001) gaya eksitasi gelombang pada silinder dalam mode gerak *heave* ditampilkan dalam Persamaan 4.17. Dengan k angka gelombang, c kekakuan benda pada mode gerak *heave*, a massa tambah benda. b koefisien damping sistem dan ω sebagai frekuensi.

$$\frac{F_a}{\zeta_a} = e^{-kT} \sqrt{\{c - a\omega^2\}^2 + \{b\omega\}^2} \quad (4.17)$$

6. RAO

Parameter-parameter dinamis dari sistem terapung untuk mode gerak *heave* terdapat dalam Tabel 4.33.

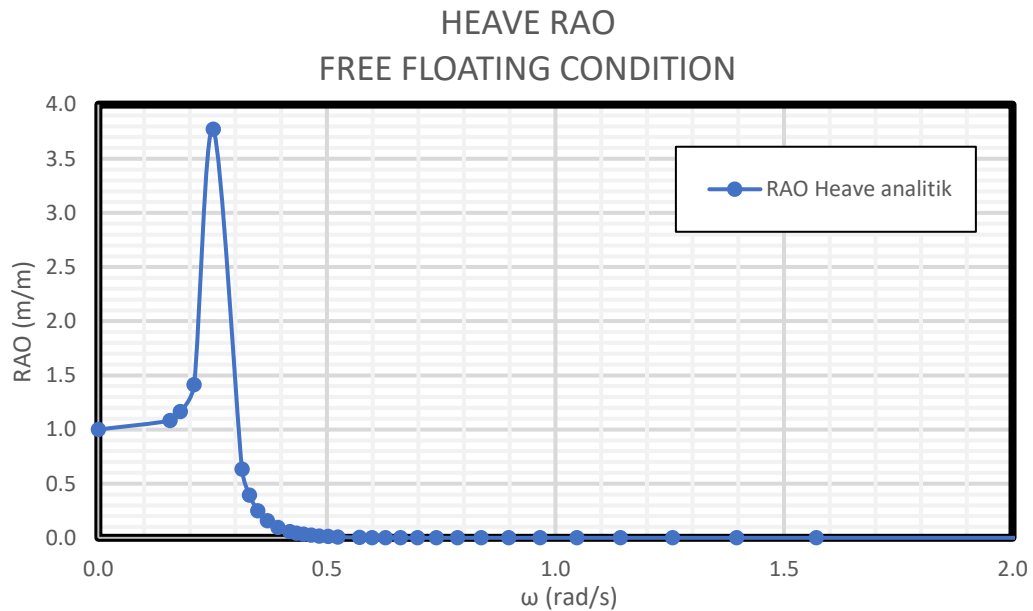
Tabel 4.33. Parameter Perhitungan RAO *Heave*.

	BESARAN	SATUAN
Displacement (m)	27834342.56	Kg
Masa Tambah (ma)	699995.77	Kg
Kekakuan (k)	2022233.43	N/m
Damping (b)	0	Ns/m

Persamaan 4.18 merupakan persamaan respon gerak bangunan. Nilai respon gerak bangunan apung akan sama dengan RAO jika dalam perhitungan amplitudo gelombang adalah 1 m

$$\zeta_{x0} = \frac{F_e}{\sqrt{\{k_x - (m + a_x)\omega^2\}^2 + (b_x\omega)^2}} \quad (4.18)$$

Tabulasi perhitungan RAO dapat dilihat di LAMPIRAN dengan sumbu absis sebagai frekuensi gelombang dan oordinat sebagai RAO. Gambar 4.37 menampilkan grafik RAO untuk gerak *heave* SPAR.



Gambar 4.37. Grafik RAO *heave* analitis.

6.5.1.3. Mode Gerak *Pitch*

Pada mode gerak *pitch* parameter dinamisnya berbeda, yaitu massa tambah, kekakuan benda, damping dan gaya eksitasinya.

1. Perhitungan *displacement*

Displacement SPAR dalam mode gerak *pitch* sama dengan dalam mode gerak *surge* maupun *heave* sehingga, nilai *displacement* yang digunakan seperti Tabel 4.31.

2. Momen inersia massa tambah

Momen inersia massa tambah dari SPAR dapat menggunakan rumus momen inersia massa pada sebuah silinder yang tercelup pada persamaan 4.19, dengan massa jenis (ρ) 1.025 kg/m^3 , R merupakan jari-jari SPAR sebesar 8 m dan l merupakan panjang SPAR sebesar 154.2 m.

$$I_a = \rho \pi R^2 l (l/2)^2 \quad (4.19)$$

3. Kekakuan

Pada mode gerak *pitch* kekakuan struktur dapat dihitung dengan Persamaan 4.20, dengan massa jenis (ρ) 1.025 kg/m³, percepatan gravitasi (g) 9.81 m/s² dan GM_L merupakan jarak titik *metacenter* SPAR dengan titik berat SPAR yaitu sebesar 5.6 m. SPAR mempunyai luas bidang air berbentuk lingkaran sehingga besar kekakuan gerak *pitch* dilampirkan dalam tabel 4.34.

$$k_{33} = \rho g \nabla \overline{GM_L} \quad (4.20)$$

4. Damping

Pada studi analitis kali ini, *damping* dari struktur pada mode gerak *pitch* digunakan nilai 0 untuk penyederhanaan perhitungan. Nilai damping 0 akan menghasilkan nilai tak terhingga pada frekuensi naturalnya. Untuk menyiasati hal tersebut, pada saat melakukan tabulasi, frekuensi tabulasinya tidak pas saat frekuensi natural benda. Hasil yang didapat menunjukkan tendensi yang sama dengan perhitungan numerik MOSES.

5. Momen Gaya

SPAR mengalami gerakan *pitch* diakibatkan adanya momen gaya. Sehingga persamaan momen gaya pada SPAR untuk gerakan *pitch* dapat dilihat pada persamaan 4.21.

$$M = (1 + C_M) \rho \pi R_1^2 \zeta_0 \omega^2 \cos(kx_c - \omega t) \int e^{kz} dz \quad (4.21)$$

6. RAO

Parameter-parameter dinamis dari sistem terapung untuk mode gerak *pitch* terdapat dalam tabel 4.34.

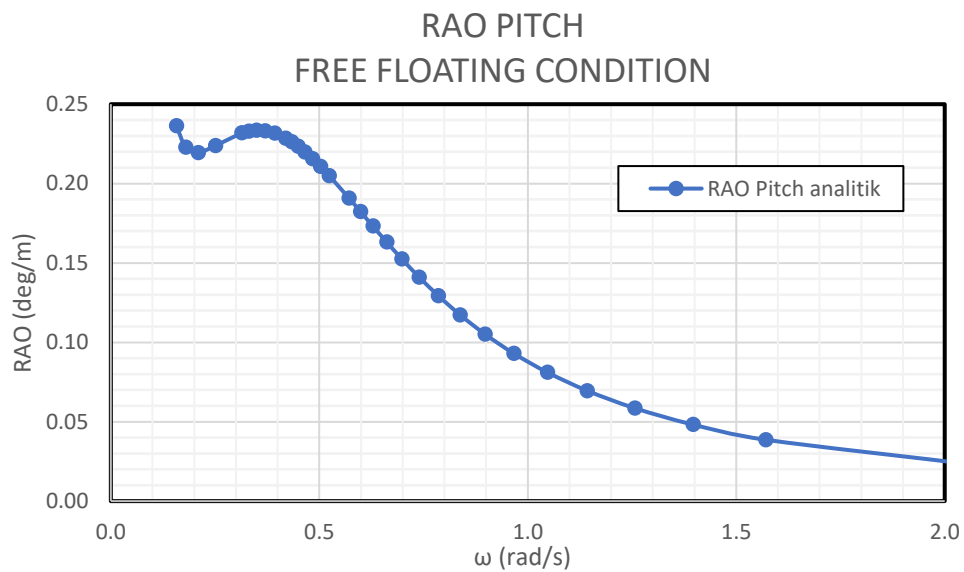
Tabel 4.34. Parameter Perhitungan RAO *Pitch*.

	BESARAN	SATUAN
Displacement (m)	27834342.56	kg
Momen inersia tambah (Ia)	168322693.5	ton.m ²
Kekakuan (k)	2E+06	KN.m
Damping (b)	0	Ns/m

Persamaan 4.22 merupakan persamaan respon gerak bangunan. Nilai respon gerak bangunan apung akan sama dengan RAO jika dalam perhitungan amplitudo gelombang adalah 1 m

$$\zeta_{\theta} = \frac{M/k}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + 2b_f \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (4.22)$$

Tabulasi perhitungan RAO dapat dilihat di LAMPIRAN dengan sumbu absis sebagai frekuensi gelombang dan ordinat sebagai RAO. Gambar 4.38 menampilkan grafik RAO untuk gerak *pitch* SPAR.



Gambar 4.38. Grafik RAO *pitch* analitis.

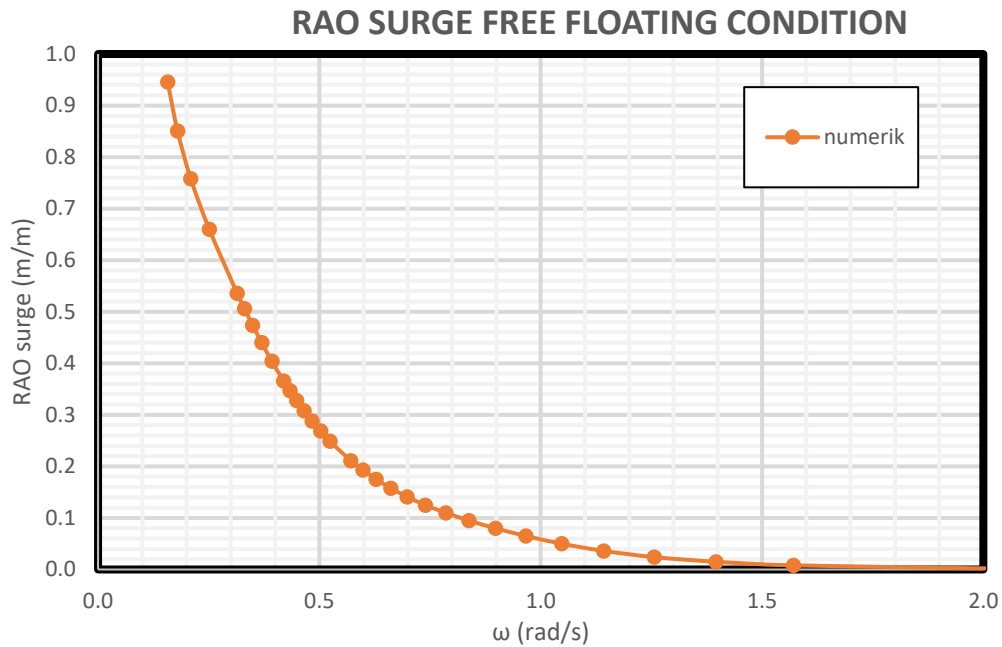
6.5.2. Metode Numeris

Perhitungan numeris dari gerak bangunan apung di kondisi terapung bebas dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MOSES dari Bentley. Model yang sudah dibuat akan dianalisis menggunakan teori *3D Panel Diffraction*. Parameter yang dimasukkan dalam perangkat lunak adalah distribusi massa dari SPAR berupa *Center of Gravity* dan Radius Girasi.

6.5.2.1. Mode Gerak Surge

Gambar 4.39 menunjukkan RAO mode gerak *surge* dari SPAR. Pada mode gerak *surge* tidak ditemukan pembesaran nilai RAO akibat adanya resonansi. Hal ini terjadi karena gerak surge dari bangunan

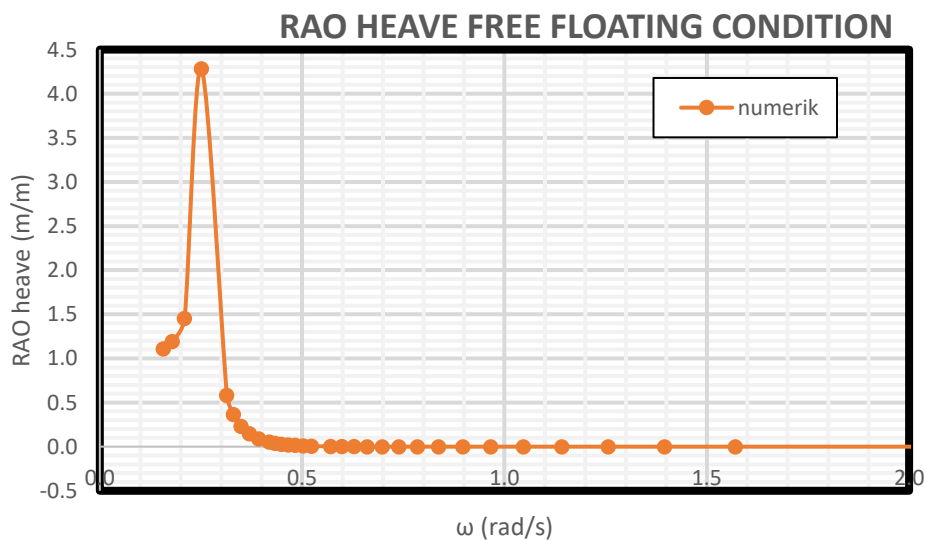
apung tidak memiliki kekakuan. Arah gelombang 0 deg memberikan respon gerak bangunan pada mode *surge* yang terbesar.



Gambar 4.39. Grafik RAO *surge* numerik.

6.5.2.2. Mode Gerak *Heave*

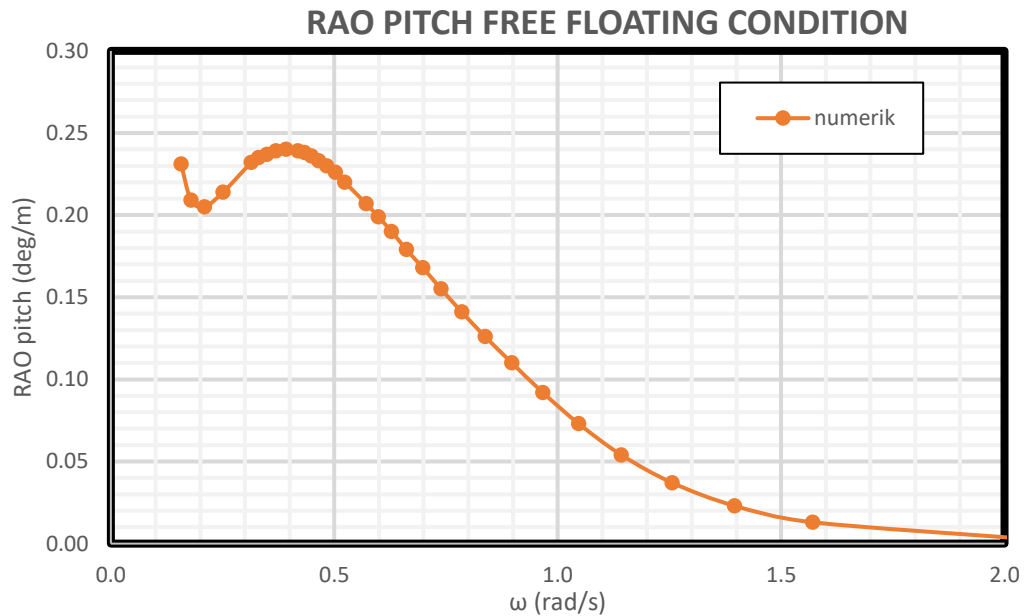
Gambar 4.40. menunjukkan RAO mode gerak *heave* dari SPAR. Arah gelombang tidak mempengaruhi nilai RAO secara signifikan, hal ini disebabkan bentuk lambung yang berupa silinder.



Gambar 4.40. Grafik RAO *heave* numerik.

6.5.2.3. Mode Gerak *Pitch*

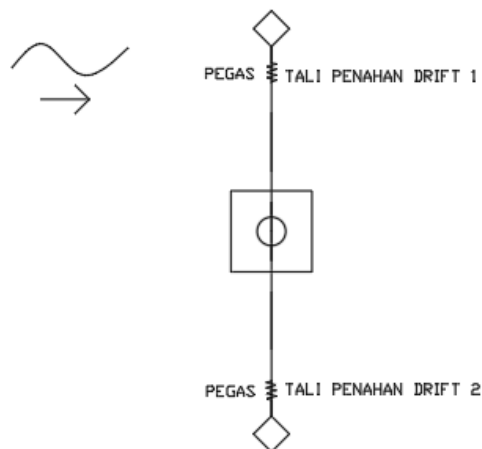
Gambar 4.41 menunjukkan RAO mode gerak *pitch* dari. Arah gelombang 0 deg memberikan respon gerak bangunan pada mode *pitch* yang terbesar.



Gambar 4.41. Grafik RAO *pitch* numeris.

6.5.3. Metode Eksperimen

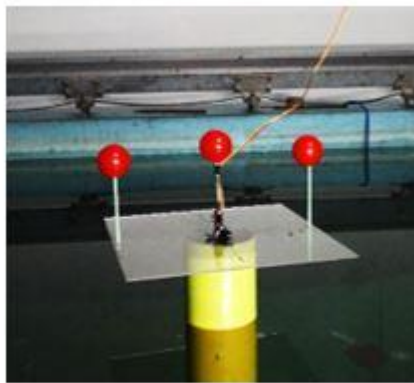
Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Model eksperimen SPAR diletakkan di kolam dengan dimensi panjang 100 m, kedalaman 1.8 dan lebar 3 m. Pada kondisi terapung bebas SPAR diletakkan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.42.



Gambar 4.42. Konfigurasi tali penahan *drift*.

Dua tali penahan *drift* digunakan untuk menjaga posisi dari struktur sehingga sesuai dengan arah yang diinginkan. Tali penahan *drift* dipasang renggang, hal ini dipasang sedemikian hingga agar tali tidak mempengaruhi gerak struktur, namun apabila *drifting* mampu menggeser model maka tali ini akan menahannya.

Model akan dikenai gelombang yang berasal dari *wave maker*. Model akan dikenai tujuh gelombang dengan karakteristik seperti pada Tabel 4.35. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan besar tinggi gelombang konstan yaitu 5 cm. Penentuan periode gelombang ditentukan dengan terlebih dulu melakukan penskalaan periode gelombang lingkungan menjadi periode gelombang eksperimen.



Gambar 4.43. Model SPAR kondisi terapung bebas.



Gambar 4.44. Lampu untuk penerangan

Setiap eksperimen mempunyai identitas eksperimen masing-masing. Kode eksperimen digunakan untuk setiap kondisi seperti pada gambar 4.45.

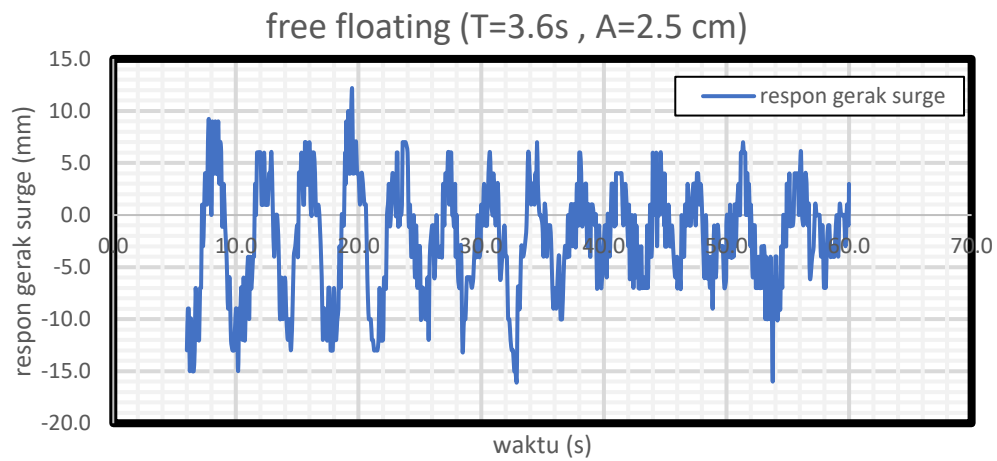
Tabel 4.35. Periode lingkungan dan periode eksperimen.

No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	FFH1a	40	3.60	2.5
2	FFH1b	30	2.70	
3	FFH1c	25	2.20	
4	FFH1d	20	1.80	
5	FFH1e	10	0.90	
6	FFH1f	35	3.10	
7	FFH1g	5.5	0.50	

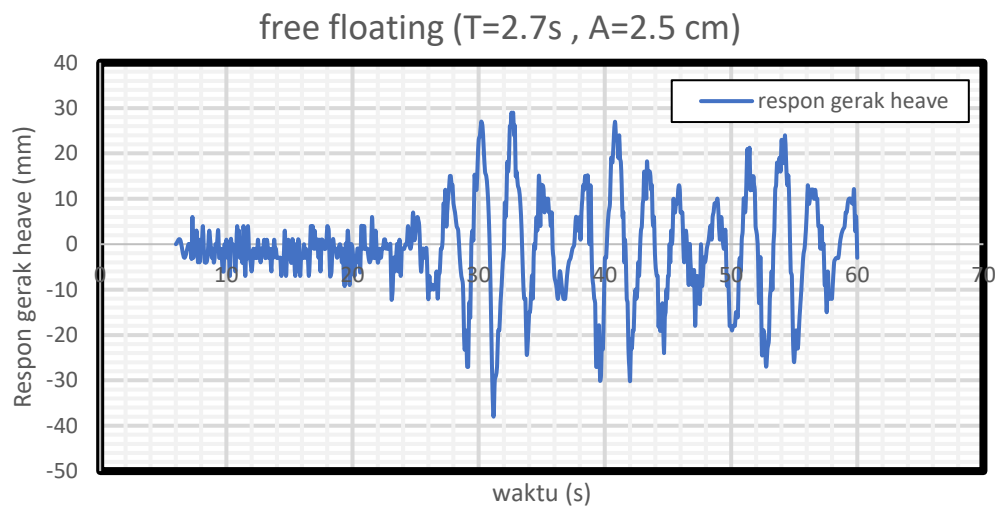


Gambar 4.45. Kode eksperimen.

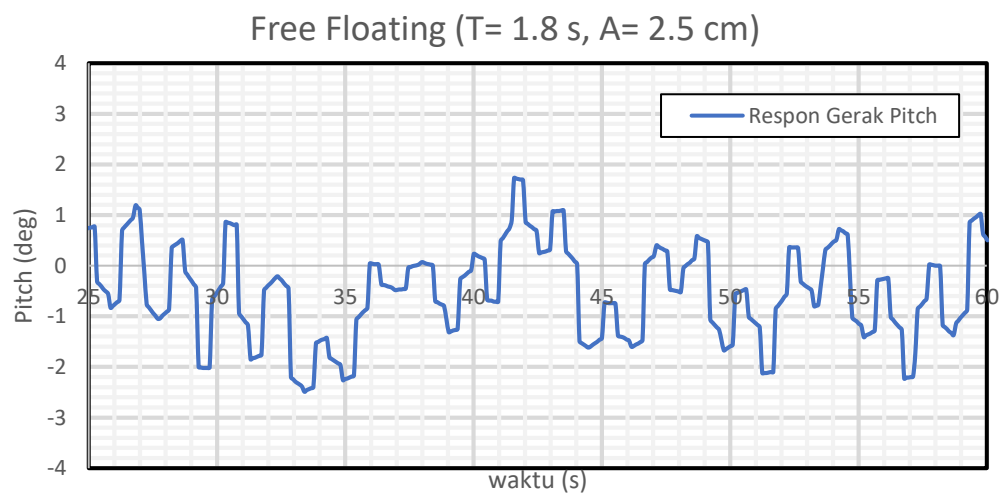
Respon dari benda yang terkena gelombang akan dicatat dengan instrumen *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* akan mencatat mode gerak *surge* dan *heave* sedangkan *gyroscope* akan mencatat gerak *pitch* struktur. Gambar 4.46 , 4.47 dan 4.48 di bawah ini merupakan salah satu contoh dari *time history* keluaran instrumen.



Gambar 4.46. Time history instrumen *image processing* untuk gerakan *surge*.



Gambar 4.47. Time history instrumen *image processing* untuk gerakan *heave*.



Gambar 4.48. Time History instrumen *gyroscope* untuk gerakan *pitch*.

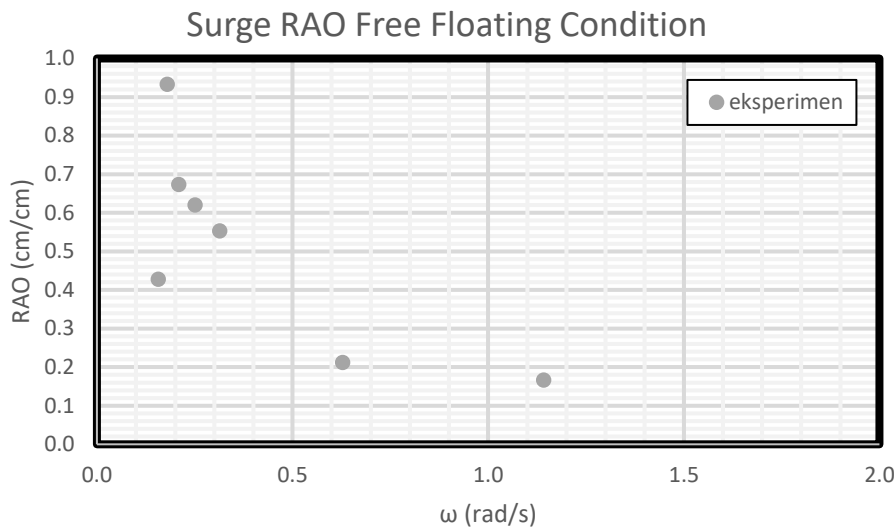
6.5.3.1. MODE GERAK SURGE

Setiap time history pada gerak *surge* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.36 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

Tabel 4.36. Respon gerak dan RAO gerakan *surge* hasil eksperimen.

No.	KODE	Respon Gerak (cm)	Respon Periode (s)	RAO (cm/cm)	Perbandingan Periode
1	FFH1a	1.0692	3.75	0.4277	0.96
2	FFH1b	1.6833	2.7273	0.6733	0.99
3	FFH1c	1.55	2.222	0.62	0.99
4	FFH1d	1.3833	2.00	0.5553	0.9
5	FFH1e	0,5308	1,00	0.2123	0,9
6	FFH1f	2.333	3.0769	0.9333	1.0075
7	FFH1g	0.433	0.47	0.1667	1.06

Kolom RAO pada Tabel 4.36 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* yang disajikan pada Gambar 4.49 berikut ini.



Gambar 4.49. Grafik RAO *surge* hasil eksperimen

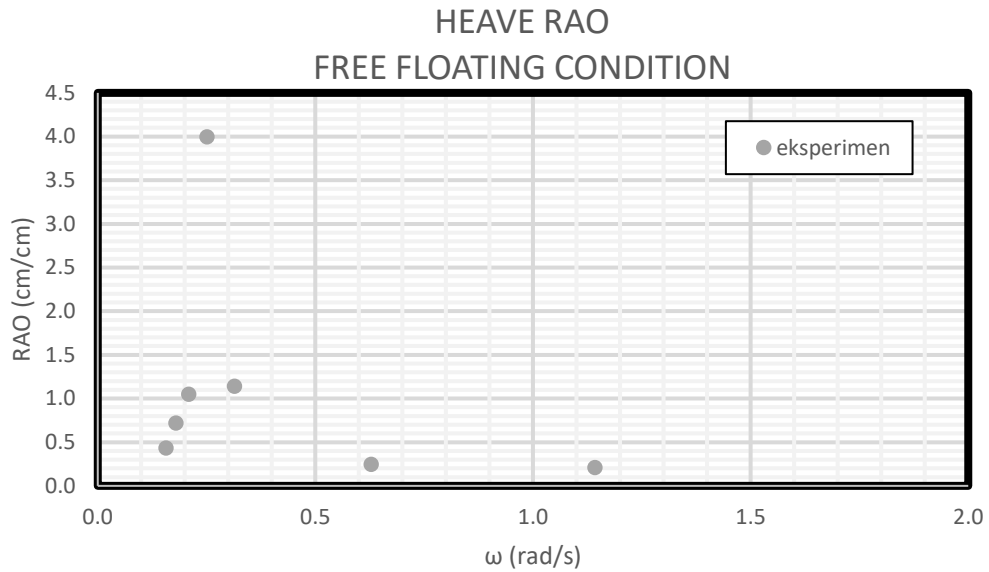
6.5.3.2. MODE GERAK HEAVE

Setiap *time history* pada gerak *heave* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.37 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

Tabel 4.37. Respon gerak dan RAO gerakan *heave* hasil eksperimen.

No.	KODE	Respon Gerak	Respon Periode	RAO	Perbandingan Periode
1	FFH1a	1.083	3.64	0.433	0.98
2	FFH1b	2.617	2.72	1.047	0.99
3	FFH1c	9.915	2.22	3.996	0.99
4	FFH1d	2.85	1.82	1.14	0.99
5	FFH1e	0.614	1.00	0.246	0.9
6	FFH1f	1.8	3.00	0.72	1.03
7	FFH1g	0.528	0.56	0.21	0.9

Kolom RAO pada Tabel 4.37 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *heave* seperti pada gambar 4.50 berikut:



Gambar 4.50. Grafik RAO *heave* hasil eksperimen.

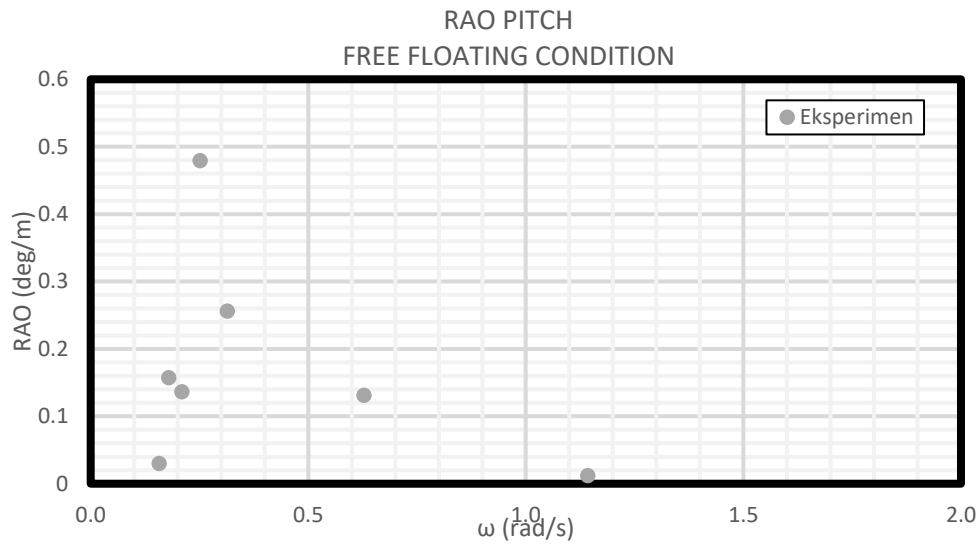
6.5.3.3. MODE GERAK PITCH

Setiap *time history* pada gerak *pitch* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.38 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

Tabel 4.38. Respon gerak dan RAO gerakan *pitch* hasil eksperimen.

No.	KODE	Respon Gerak	Respon Periode	RAO (deg/cm)	Perbandingan Periode
1	FFH1a	0.074	3.316	0.030	0.947
2	FFH1b	0.339	2.926	0.136	1.084
3	FFH1c	1.021	2.089	0.479	0.950
4	FFH1d	0.641	1.890	0.256	1.050
5	FFH1e	0.327	0.956	0.131	1.062
6	FFH1f	0.391	3.203	0.156	1.033
7	FFH1g	0.026	0.465	0.012	0.931

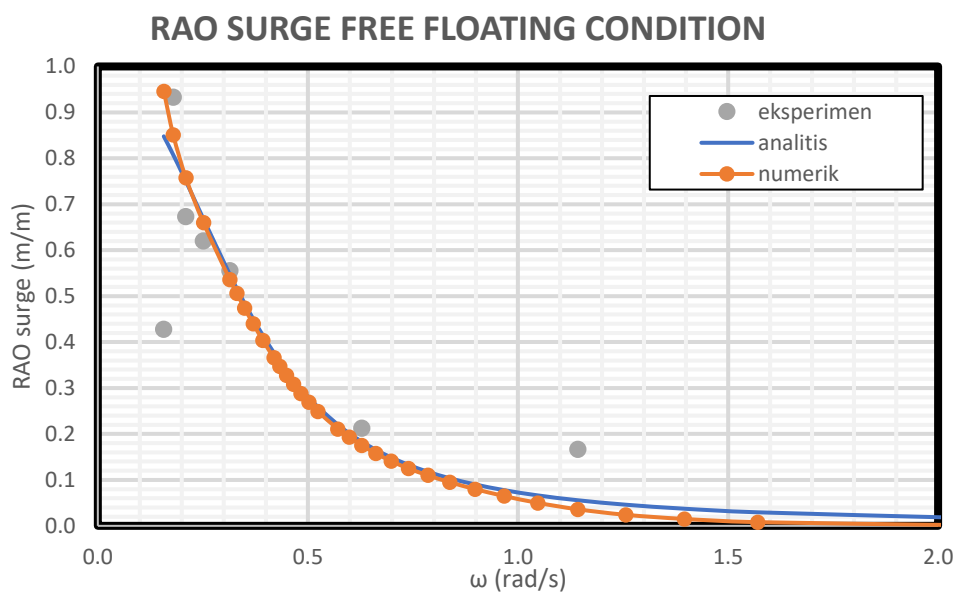
Kolom RAO pada Tabel 4.38 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak pitch seperti yang disajikan pada gambar 4.51. berikut ini.



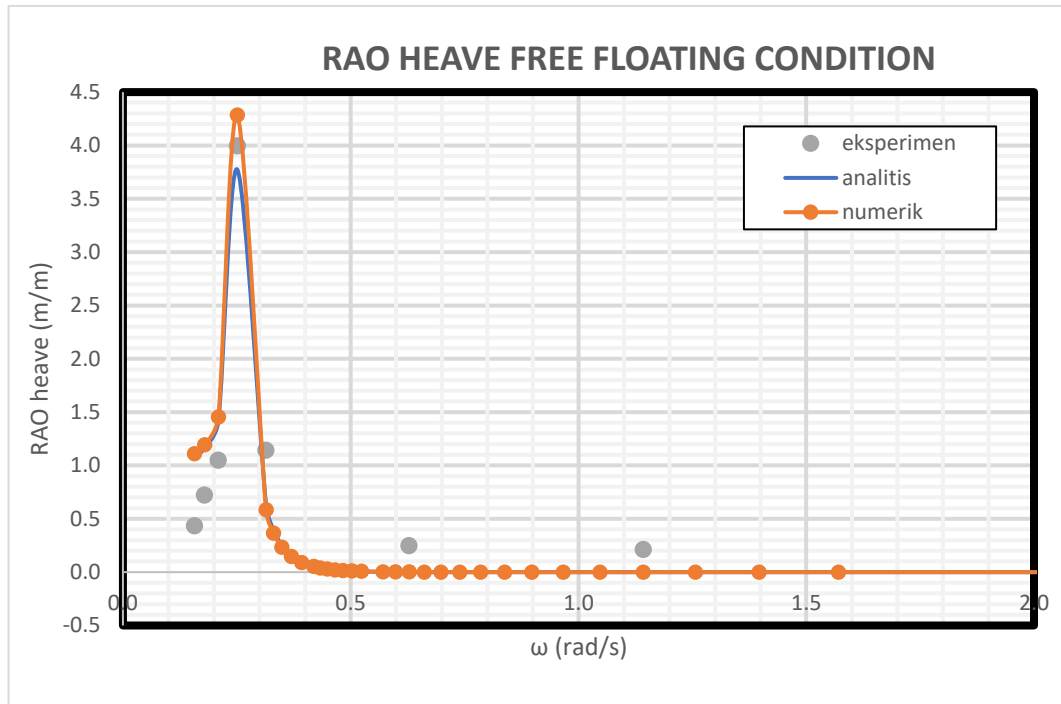
Gambar 4.51. Grafik RAO *pitch* hasil eksperimen.

6.5.4. Perbandingan RAO Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen

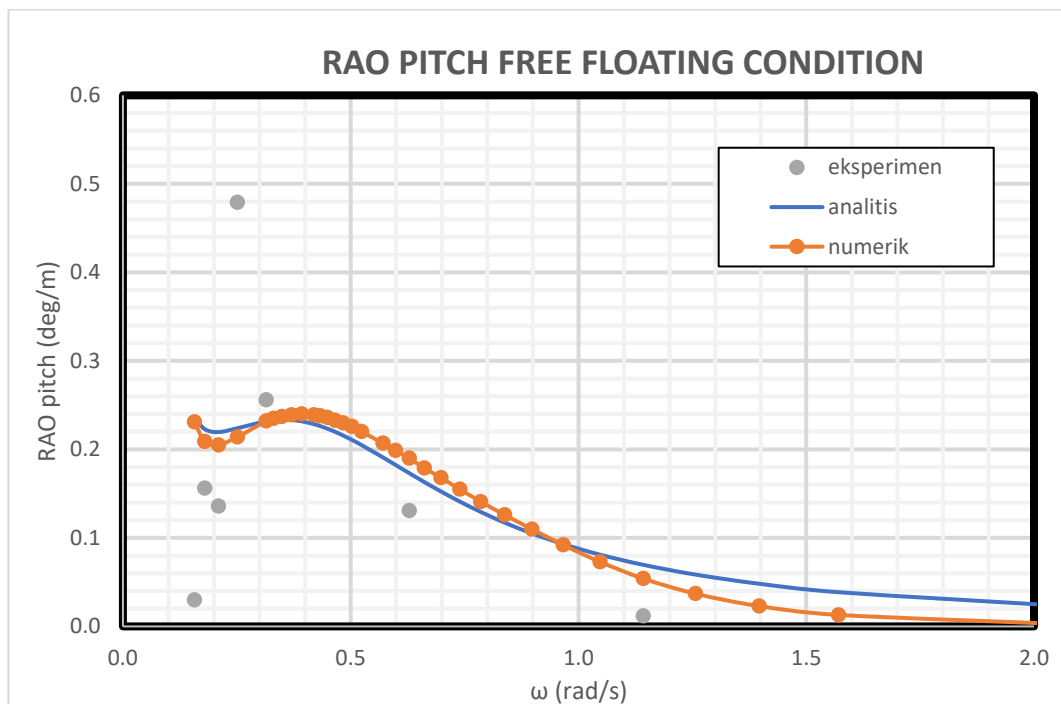
Gambar 4.52, 4.53 dan 4.54 menunjukkan perbandingan RAO terapung bebas pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode analitis, numeris dan eksperimen untuk tiap gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* yang terjadi.



Gambar 4.52. Perbandingan RAO *surge* secara analitis, numeris dan eksperimen.



Gambar 4.53. Perbandingan RAO *heave* secara analitis, numeris dan eksperimen.



Gambar 4.54. Perbandingan RAO *pitch* secara analitis, numeris dan eksperimen.

6.6. RAO TERTAMBAT

6.6.1. Kekakuan Tali Tambat

Pada bangunan tertambat kekakuan hidrostatik benda akan ditambahkan dengan kekakuan tali tambat. Pada kekakuan hidrostatik, mode gerak yang memiliki kekakuan hanya gerak *heave*, *roll* dan *pitch*. Namun dengan adanya kekakuan tali tambat, ke enam mode gerak (*surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw*) memiliki kekakuan baru. Pada Tugas Akhir ini, konfigurasi tali tambat merupakan jenis *taut* dan perhitungan kekakuan *surge* diselesaikan menggunakan Faltinsen (1990), kekakuan *heave* diselesaikan menggunakan Al-Solihat dan Nahon (2015) dan kekakuan *pitch* menggunakan Jain (1980). Kondisi taut mempunyai kekakuan karakteristik sesuai dengan Persamaan 4.23, dengan E sebagai modulus elastis tali, A sebagai luas penampang tali dan L_o sebagai panjang tali kondisi tak terenggang. Perhitungan Persamaan 4.23 dilakukan dengan data berdasar Tabel 4.18.

$$k_I = \frac{EA}{L_o}$$
$$k_I = \frac{11175000000}{225} \quad (4.23)$$
$$k_I = 52222222.222 \text{ N/m}$$

Pada kondisi *taut*, tali juga memiliki *pre-tension*, yang akan merubah panjang tali sesuai dengan Persamaan 4.24, dengan L_o sebagai panjang tali tak terenggang, T sebagai pretension, E modulus elastisitas dan A sebagai luas penampang. Tabel 4.39 menunjukkan nilai *pre-tension* dan panjang yang terjadi.

$$L = L_o \left(1 + \frac{T}{EA}\right) \quad (4.24)$$

Tabel 4.39. Perhitungan *Pre Tension* dan Panjang Akibat *Pre-Tension*.

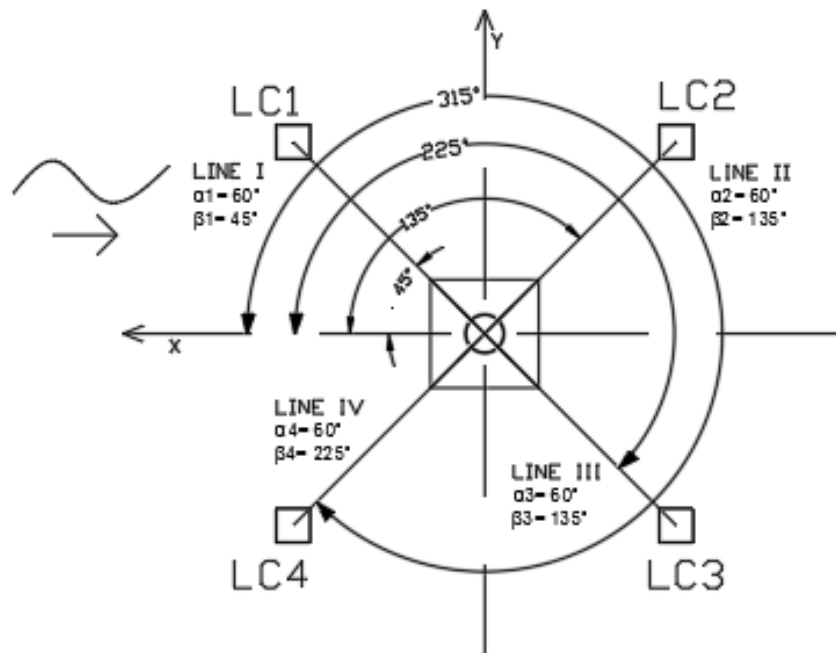
T	904874.4	N
L	225.173	m

6.6.1.1. Kekakuan *Surge*

Kekakuan *surge* dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 4.25, dengan k_i sebagai kekakuan parametrik, N sebagai jumlah tali dan β sebagai sudut sebar tali tambat (Gambar 4.55). Sudut sebar dapat dilihat pada Tabel 4.40. Persamaan 4.25 menunjukkan bahwa kekakuan *surge* total merupakan penjumlahan dari kekakuan tiap tali. Hasil perhitungan kekakuan tiap tali dapat dilihat di Tabel 4.41.

Tabel 4.40. Sudut sebar tali.

Sudut Sebar-Line (deg)	
β_1	45
β_2	135
β_3	225
β_4	315



Gambar 4.55. Konfigurasi SPAR.

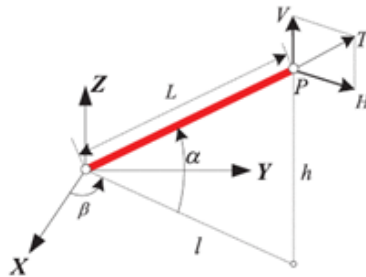
$$C_{11} = \sum_{i=1}^N k_i \cos^2 \beta_i \quad (4.25)$$

Tabel 4.41. Kekakuan *surge*.

	K11	
LineA	2611111.11	N/m
LineB	2611111.11	N/m
LineC	2611111.11	N/m
LineD	2611111.11	N/m
K11 (TOTAL)	10444444.44	N/m

6.6.1.2. Kekakuan *Heave*

Al-Solihat dan Nahon (2015) menentukan konfigurasi kekakuan tali dengan menggunakan Gambar 4.56. Konfigurasi tali tambat pada SPAR kali ini memiliki bentuk sesuai dengan Gambar 4.55. Tabel 4.42 menunjukkan data konfigurasi sudut antara tanah dengan tali. Setiap tali memiliki kekakuan karakteristik sesuai dengan persamaan 4.26, dengan H sebagai gaya horizontal, V gaya Vertikal, l jarak horizontal *fairlead* dengan *anchor* dan h sebagai tinggi (Gambar 4.56).



Gambar 4.56. Parameter geometris tali tambat. (Al-Solihat dan Nahon, 2015)

Tabel 4.42. Konfigurasi Sudut Tanah-Tali.

Sudut Tanah-Line (deg)	
α_1	60
α_2	60
α_3	60
α_4	60

$$\mathbf{K}^p = \begin{bmatrix} K_{11}^p & K_{12}^p \\ K_{21}^p & K_{22}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial l} & \frac{\partial H}{\partial h} \\ \frac{\partial V}{\partial l} & \frac{\partial V}{\partial h} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Konfigurasi *Taut Mooring* juga memiliki pendekatan Al-Solihat dan Nahon (2015) seperti Persamaan 4.27 (a-e).

$$H = T \cos \alpha \quad (4.27a)$$

$$V = T \sin \alpha \quad (4.27b)$$

$$l = L \cos \alpha \quad (4.27c)$$

$$h = L \sin \alpha \quad (4.27d)$$

Persamaan 4.26 diturunkan oleh Al-Solihat & Nahon (2015) sehingga menghasilkan Persamaan 4.28.

$$\frac{\partial H}{\partial l} = \cos^2 \alpha K_l + \frac{T}{L} \sin^2 \alpha \quad (4.28a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial h} = \sin^2 \alpha K_l + \frac{T}{L} \cos^2 \alpha \quad (4.28b)$$

$$\frac{\partial H}{\partial h} = \frac{\partial V}{\partial l} = \cos \alpha \sin \alpha \left[K_l - \frac{T}{L} \right] \quad (4.28c)$$

Dengan data pada Tabel 4.18 maka karakteristik kekakuan pada setiap tali dilampirkan pada Tabel 4.43.

Tabel 4.43. Kekakuan Karakteristik.

	kp11 (N/m)	kp22 (N/m)	kp12 (N/m)
LineA	1308569.48	3917671.31	2259548.46
LineB	1308569.48	3917671.31	2259548.46
LineC	1308569.48	3917671.31	2259548.46
LineD	1308569.48	3917671.31	2259548.46

Al-Solihat & Nahon (2015) menentukan untuk gerakan *heave* dapat diselesaikan menggunakan Persamaan 4.29.

$$K_{33} = K_{22}^p \quad (4.29)$$

Setiap tali memberi kekakuan tambahan pada setiap mode gerak, sehingga kekakuan total merupakan penjumlahan dari kekakuan

mode gerak pada setiap tali, sesuai dengan Persamaan 4.30. Kekakuan total tali tambat *heave* dapat dilihat di Tabel 4.44.

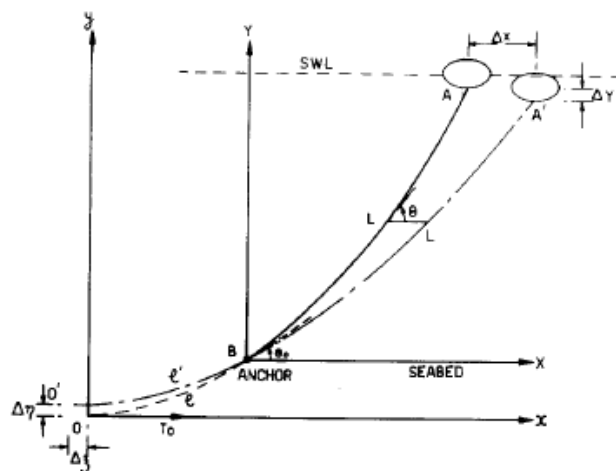
$$K_m = \sum_{i=1}^N [K_m^{(i)}] \quad (4.30)$$

Tabel 4.44. Kekakuan mode gerak *heave*.

	k33	
LineA	3917671.31	N/m
LineB	3917671.31	N/m
LineC	3917671.31	N/m
LineD	3917671.31	N/m
K33 (TOTAL)	15670685.24	N/m

6.6.1.3. Kekakuan *Pitch*

Jain (1980) membuat persamaan simplifikasi untuk mencari kekakuan benda tertambat. Hal ini dilakukan dengan memberi titik tambat bayangan, seperti pada Gambar 4.57. Persamaan 4.31 merupakan hasil penurunan untuk gerak *pitch* dengan T_0 sebagai *pre-tension* sumbu x, X jarak radius *fairlead* dengan anchor, Y sebagai kedalaman, L' sebagai panjang baru, dan l sebagai panjang bayangan.



Gambar 4.57. Titik bayangan. (Jain, 1980)

$$k_{55} = T_o \left[w \left(\frac{T_B L' - T_A l}{T_A - T_B} \right) \left\{ \frac{X}{T_o} - \left(\frac{T_B L' - T_A l}{T_A T_B} \right) \right\} - \frac{T_o^2 Y}{T_A T_B} \right]^{-1} \quad (4.31)$$

T_a dan T_b merupakan tegangan tali di titik A dan titik B dengan Persamaan 4.32. dan 4.33. Perhitungan kekakuan tali tambat dapat dilihat di Tabel 4.45.

$$T_A = T_o \left[1 + \left(\frac{wL'}{T_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.32)$$

$$T_B = T_o \left[1 + \left(\frac{wl}{T_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.33)$$

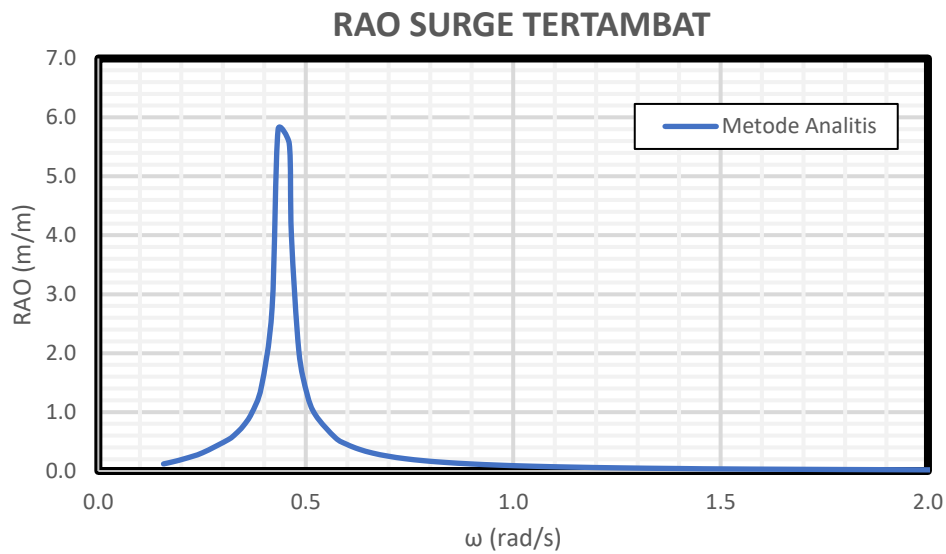
Tabel 4.45. Kekakuan mode gerak *pitch*.

	K55	
Line 1	5765049068.151	N
Line 2	5765049068.151	N
Line 3	5765049068.151	N
Line 4	5765049068.151	N
K55 Total	23060196272.604	N

6.6.2. Metode Analitis

6.6.2.1. Mode Gerak *Surge*

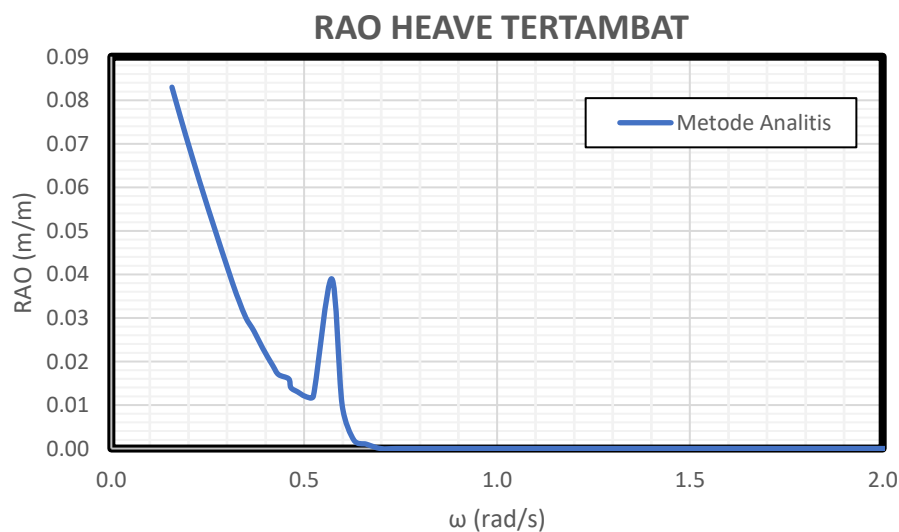
Data pada Tabel 4.43 menunjukkan kekakuan tiap tali tambat beserta kekakuan total mode gerak *surge*. Dengan menggunakan metode yang sama seperti kondisi terapung bebas, maka RAO dari *surge* tertambat dihitung dengan metode analitis. Tabulasi perhitungan dapat dilihat di LAMPIRAN. Gambar 4.58 merupakan grafik RAO *surge*. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara analitis sebesar 5.796 m/m pada frekuensi 0.43 rad/s.



Gambar 4.58. RAO *Surge* tertambat metode analitis.

6.6.2.2. Mode Gerak *Heave*

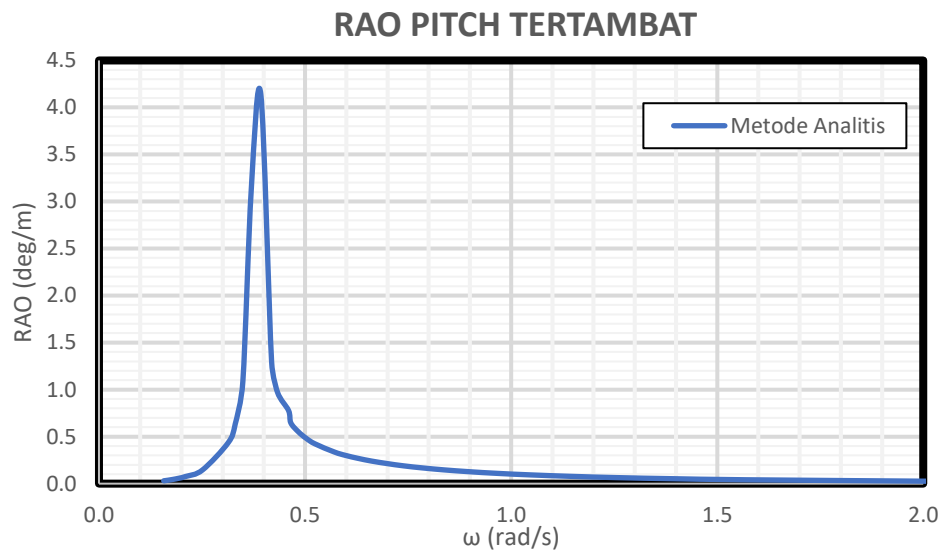
Kekakuan total merupakan penjumlahan dari kekakuan *heave* setiap tali tambat. Tabel 4.44 menunjukkan kekakuan tiap tali tambat beserta kekakuan total. Dengan menggunakan metode yang sama seperti kondisi terapung bebas, maka RAO dari *heave* tertambat dengan metode analitis dapat dihitung. Tabulasi perhitungan dapat dilihat di LAMPIRAN. Gambar 4.59 merupakan grafik RAO *Heave* tertambat. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara analitis sebesar 0.083 m/m pada frekuensi 0.16 rad/s.



Gambar 4.59. RAO *heave* tertambat metode analitis.

6.6.2.3. Mode Gerak Pitch

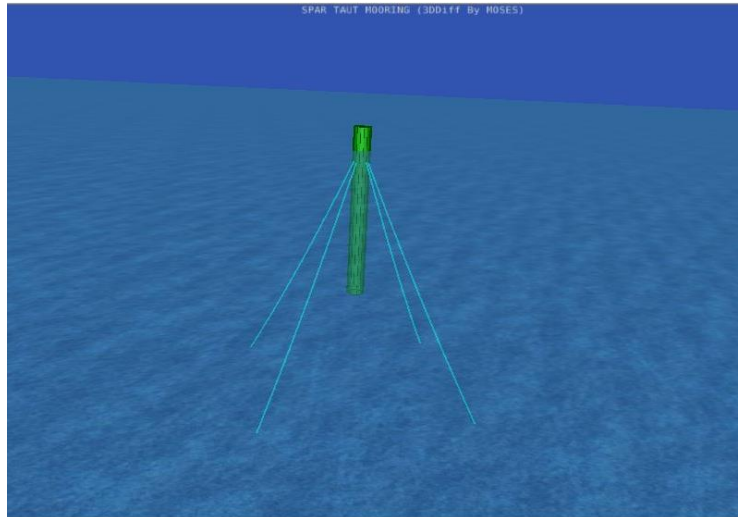
Kekakuan total merupakan penjumlahan dari kekakuan *pitch* setiap tali tambat. Tabel 4.45 menunjukkan kekakuan tiap tali tambat beserta kekakuan total mode gerak *pitch*. Dengan menggunakan metode yang sama seperti sub-bab, maka RAO dari *pitch* tertambat dengan metode analitis. Tabulasi perhitungan dapat dilihat di LAMPIRAN. Gambar 4.60. merupakan grafik RAO *pitch* tertambat. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara analitis sebesar 4.138 deg/m pada frekuensi 0.39 rad/s.



Gambar 4.60. RAO *Pitch* tertambat metode analitis.

6.6.3. Metode Numeris

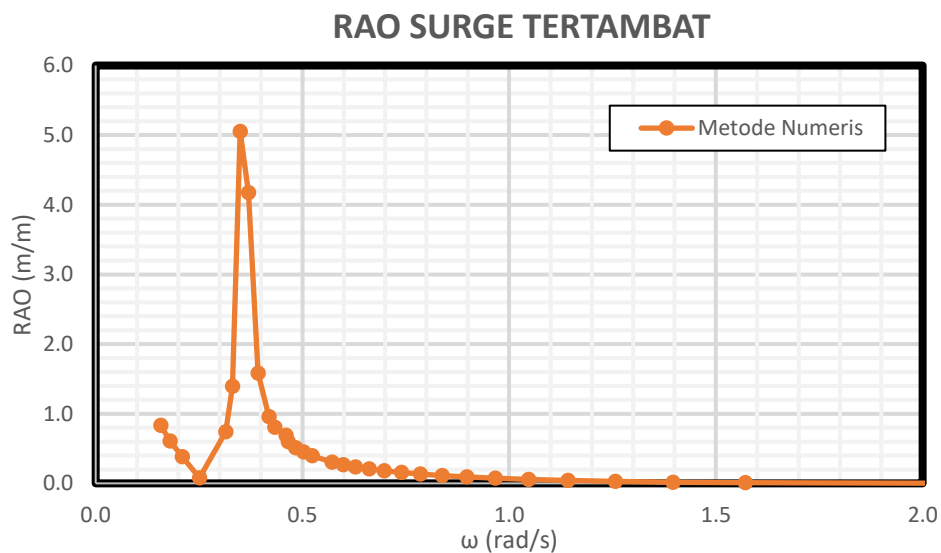
Perhitungan numeris dari gerak bangunan apung di kondisi tertambat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MOSES dari Bentley. Model yang sudah dibuat akan dianalisis menggunakan teori *3D Panel Diffraction*. Metode yang digunakan mirip dengan kondisi terapung bebas, tetapi dengan penambahan tali tambat dan parameternya. Dalam analisa numeris dilakukan perhitungan dari arah datang gelombang 0 derajat.



Gambar 4.61. Kondisi tertambat dalam MOSES

6.6.3.1. Mode Gerak *Surge*

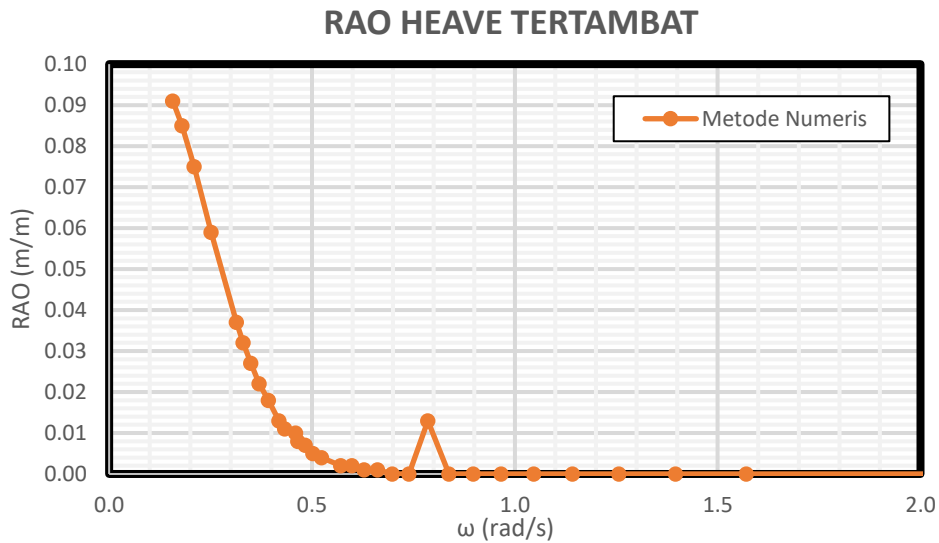
Gambar 4.62 menunjukkan RAO mode gerak *surge* dari SPAR dengan arah datang gelombang 0 derajat. Hasil dari perhitungan perangkat lunak MOSES terdapat pada LAMPIRAN. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara numeris sebesar 5.053 m/m pada frekuensi 0.35 rad/s.



Gambar 4.62. RAO *surge* tertambat metode numerik.

6.6.3.2.Mode Gerak Heave

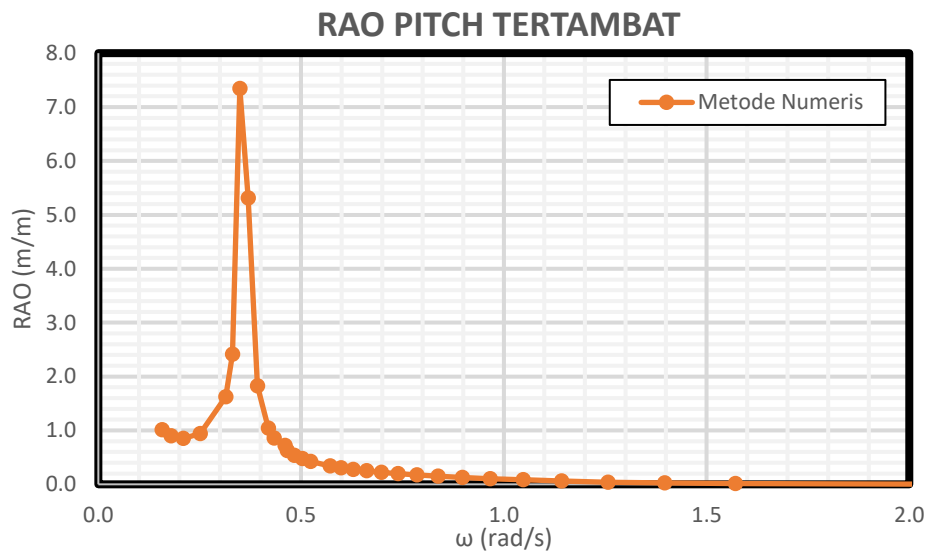
Gambar 4.63 menunjukkan RAO mode gerak *heave* dari SPAR dengan arah datang gelombang 0 derajat. Hasil dari perhitungan perangkat lunak MOSES terdapat pada LAMPIRAN. RAO tertinggi dari *heave* tertambat secara numeris sebesar 0.091 m/m pada frekuensi 0.16 rad/s.



Gambar 4.63. RAO *heave* tertambat metode numerik.

6.6.3.3.Mode Gerak Pitch

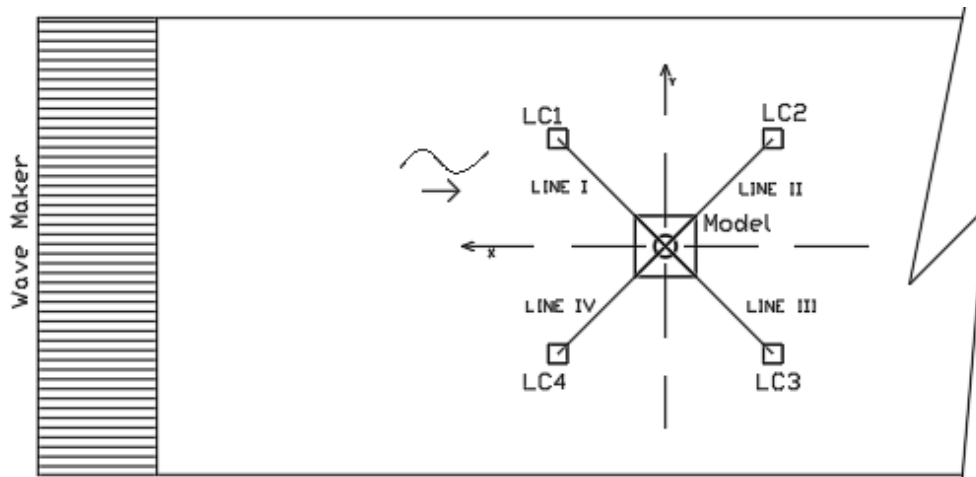
Gamba 4.64 menunjukkan RAO mode gerak *pitch* dari SPAR dengan arah datang gelombang 0 derajat. Hasil dari perhitungan perangkat lunak MOSES terdapat pada LAMPIRAN. RAO tertinggi dari *pitch* tertambat secara numeris sebesar 7.344 deg/m pada frekuensi 0.35 rad/s.



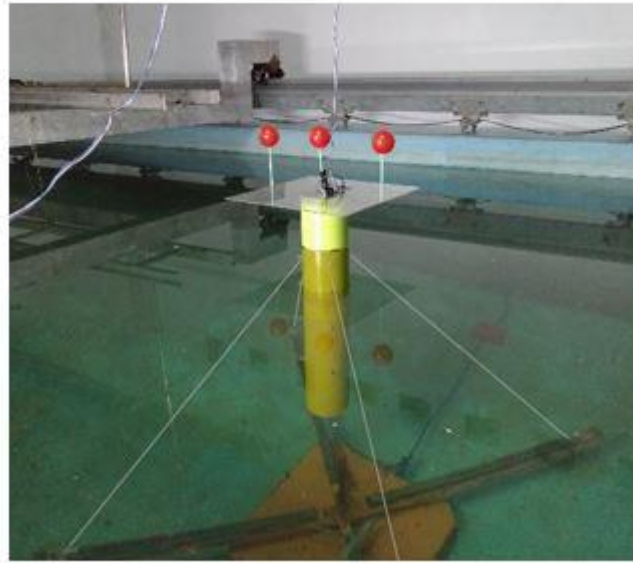
Gambar 4.64. RAO *pitch* tertambat metode numerik.

6.6.4. Metode Eksperimen

Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Model fisik diletakkan di kolam dengan dimensi panjang 100 m, kedalamann 1.8 dan lebar 3 m. Pada kondisi tertambat model fisik diletakkan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.65. SPAR dalam kondisi tertambat di laboratorium Hidrodinamika ITS ditunjukkan pada gambar 4.66.



Gambar 4.65. Konfigurasi eksperimen model fisik tertambat.



Gambar 4.66. Ekseperimen SPAR Tertambat

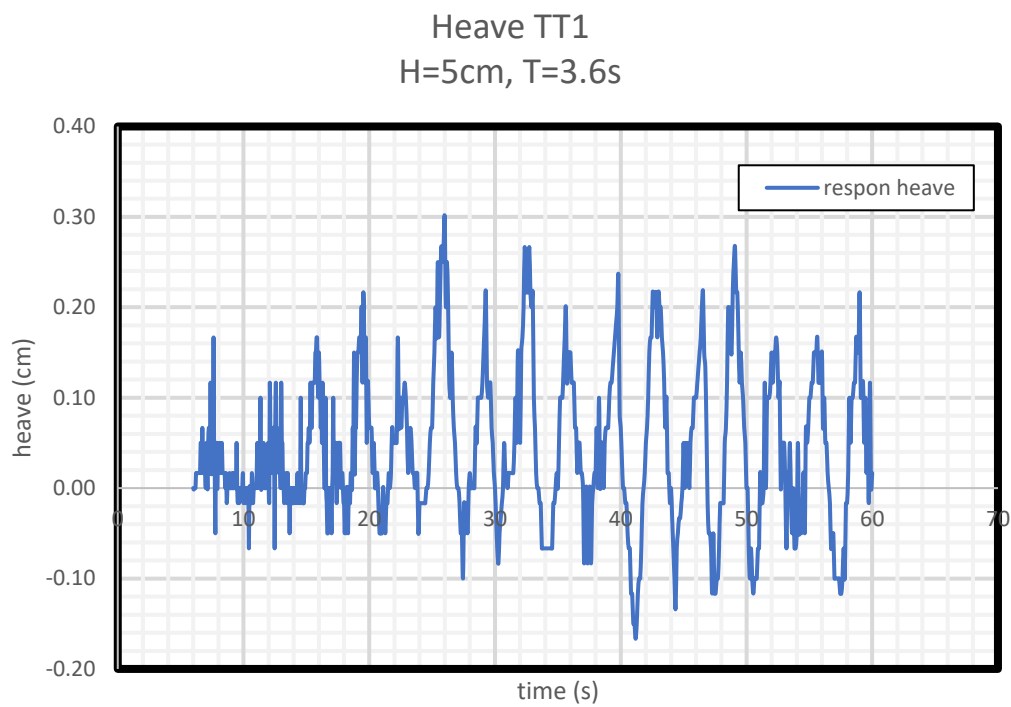
Tali tambat yang digunakan sebanyak empat buah yang diatur dengan panjang yang sama dan tali dipasang dalam kondisi *taut*. Tali tambat dihubungkan pada *load cell* yang berada pada jangkar yang telah berada di dasar kolam untuk mencatat tegangan tali yang terjadi.

Model akan dikenai gelombang yang berasal dari *wave maker*. Model akan dikenai 9 gelombang dengan karakteristik seperti pada Tabel 4.46. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan tinggi gelombang konstan. Penentuan periode gelombang ditentukan dengan terlebih dulu melakukan penskalaan periode gelombang lingkungan menjadi periode gelombang eksperimen.

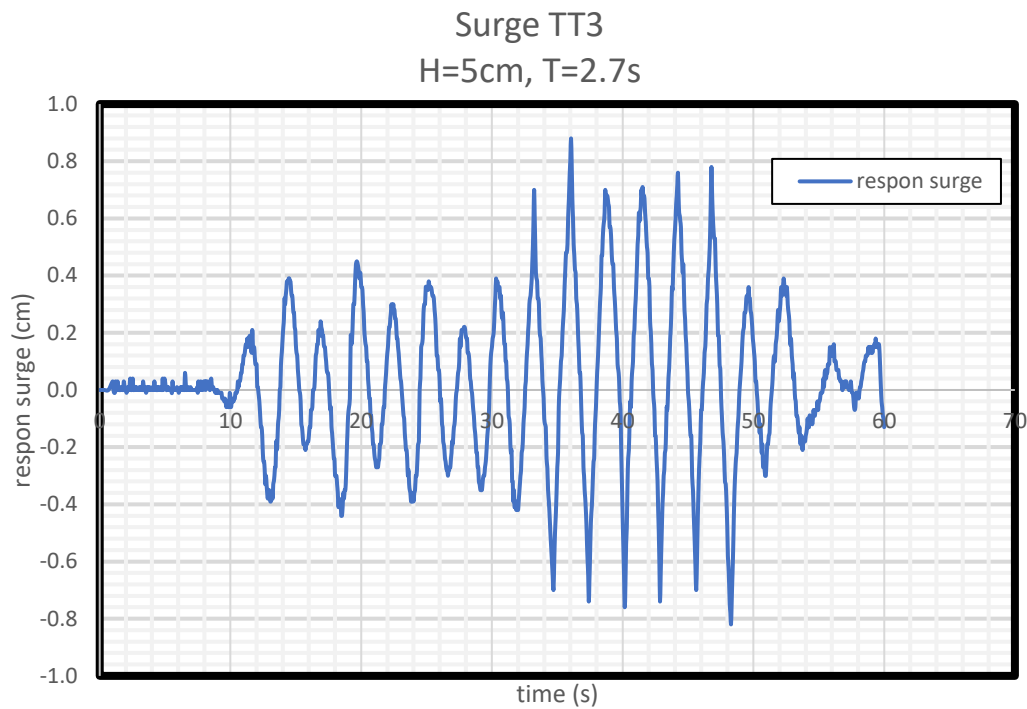
Respon dari benda yang terkena gelombang akan dicatat dengan instrumen *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* akan mencatat mode gerak *surge* dan *heave* sedangkan *gyroscope* akan mencatat gerak *pitch* struktur. Gambar 4.67, 4.68 dan 4.69 merupakan salah satu contoh dari *time history* hasil dari instrumen.

Tabel 4.46. Periode lingkungan dan periode eksperimen model fisik tertambat yang digunakan.

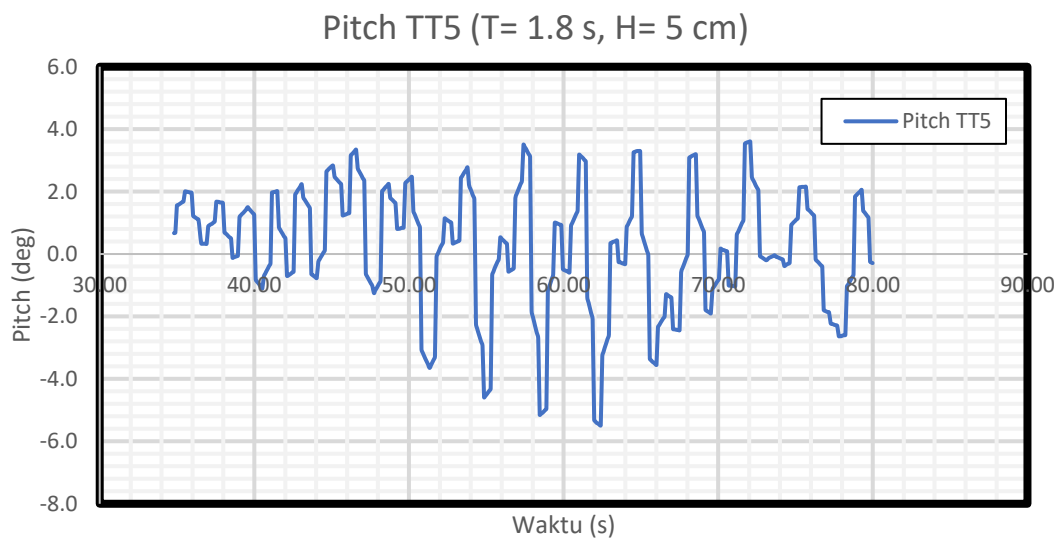
No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	TT1	40	3.6	2.5
2	TT2	35	3.1	
3	TT3	30	2.7	
4	TT4	25	2.2	
5	TT5	20	1.8	
6	TT6	18	1.6	
7	TT7	16	1.4	
8	TT8	15	1.3	
9	TT9	10	0.9	



Gambar 4.67. Time history instrumen image processing untuk gerakan heave tertambat.



Gambar 4.68. *Time history instrumen image processing untuk gerakan surge tertambat.*



Gambar 4.69. *Time History instrumen gyroscope untuk gerakan pitch tertambat.*

6.6.4.1. Mode Gerak Surge

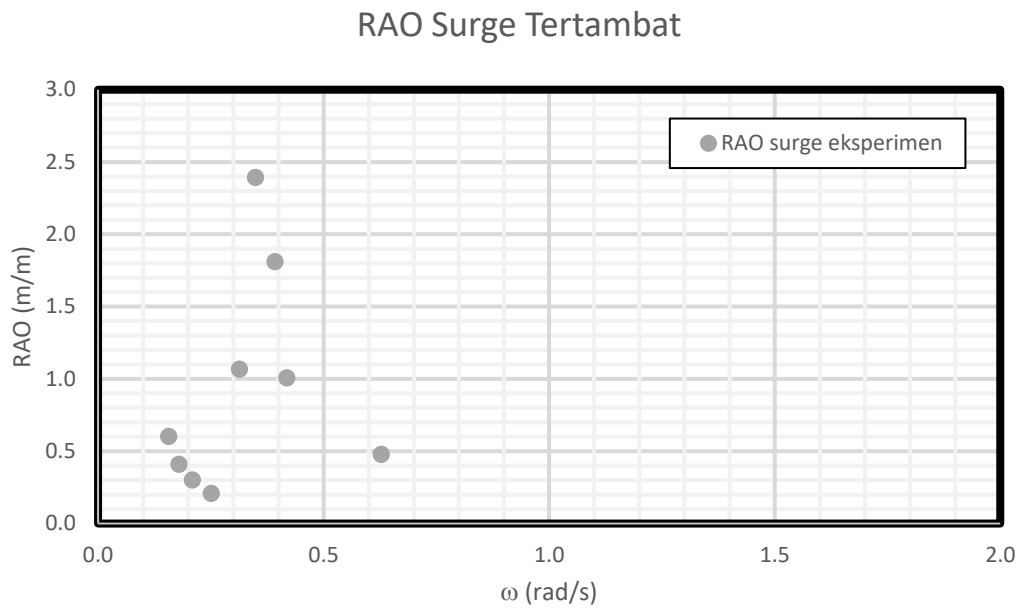
Setiap *time history* pada gerak *surge* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo

respon gerak dengan amplitudo gelombang. Periode respon dibandingkan dengan periode gelombang datang. Tabel 4.47 menunjukkan hasil eksperimen yang dilakukan pada mode gerak *surge*.

Tabel 4.47. Respon gerak dan RAO gerakan *surge* hasil eksperimen kondisi tertambat.

No.	KODE	Respon Gerak (cm)	Respon Periode (s)	RAO (cm/cm)	Perbandingan Periode
1	TT1	1.49	3.33	0.60	1.08
2	TT2	1.02	3.33	0.41	1.07
3	TT3	0.75	2.86	0.30	1.06
4	TT4	0.52	2.22	0.21	1.01
5	TT5	2.66	2.00	1.07	1.11
6	TT6	5.98	1.67	2.39	1.04
7	TT7	4.53	1.43	1.81	1.02
8	TT8	2.52	1.25	1.01	1.04
9	TT9	1.19	0.83	0.48	1.08

Kolom RAO pada Tabel 4.47 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* model tertambat yang disajikan pada Gambar 4.70. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara eksperimen sebesar 2.390 m/m pada frekuensi 0.35 rad/s.



Gambar 4.70. Grafik RAO *surge* tertambat eksperimen.

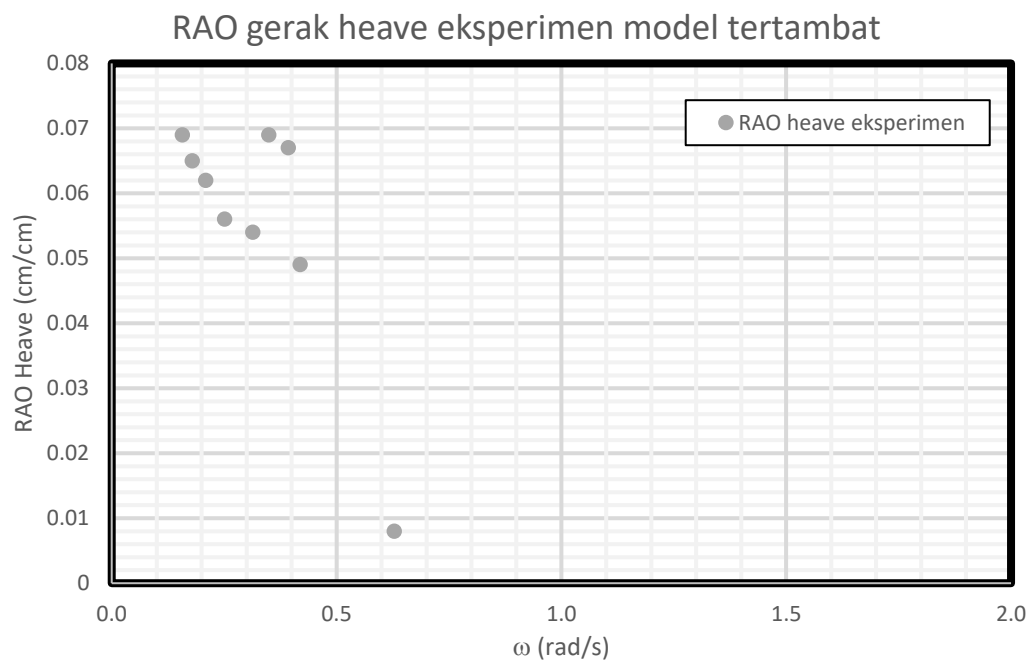
6.6.4.2. Mode Gerak *Heave*

Setiap *time history* pada gerak *heave* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.48 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO model dalam kondisi tertambat dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

Kolom RAO pada Tabel 4.48 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* model tertambat yang disajikan pada gambar 4.71. RAO tertinggi dari *heave* tertambat secara eksperimen sebesar 0.069 m/m pada frekuensi 0.16 rad/s.

Tabel 4.48. Respon gerak dan RAO gerakan *heave* hasil eksperimen kondisi tertambat.

No.	KODE	Respon Gerak (cm)	Respon Periode (s)	RAO (cm/cm)	Perbandingan Periode
1	TT1	0,348	3,75	0,069	1,04
2	TT2	0,163	3,38	0,065	1,09
3	TT3	0,154	2,86	0,062	1,06
4	TT4	0,142	2,19	0,056	1,00
5	TT5	0,135	1,79	0,054	1,00
6	TT6	0,174	1,59	0,069	1,00
7	TT7	0,168	1,58	0,067	1,13
8	TT8	0,123	1,48	0,049	1,14
9	TT9	0,019	0,83	0,008	1,084



Gambar 4.71. Grafik RAO *heave* tertambat eksperimen.

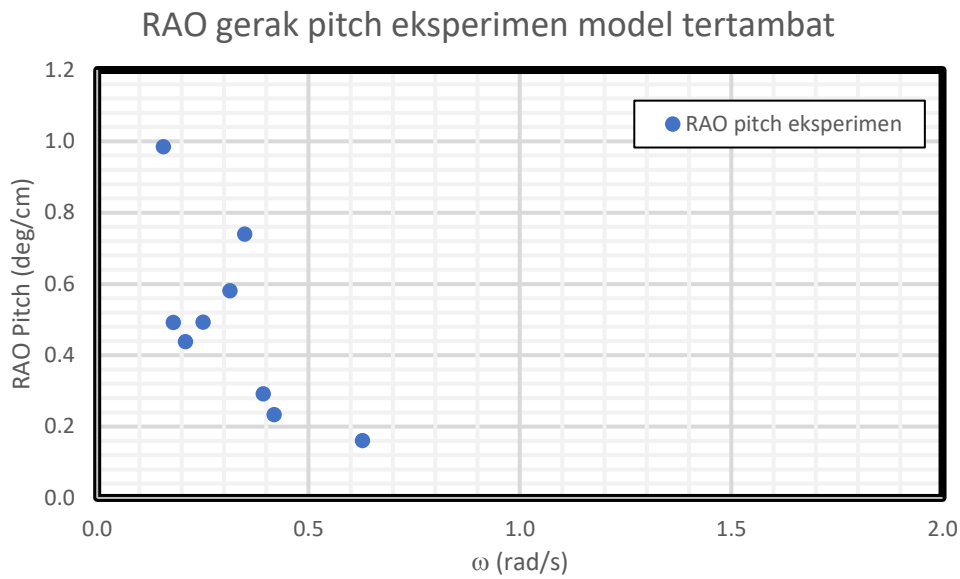
6.6.4.3.Mode Gerak *Pitch*

Setiap *time history* pada gerak *pitch* dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan merata-rata respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. RAO merupakan perbandingan antara amplitudo respon gerak dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.49 menunjukkan respon gerak dan periode respon struktur dari setiap gerakan beserta RAO model dalam kondisi tertambat dan perbandingan periode respon dan periode gelombang.

Kolom RAO pada Tabel 4.49 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* model tertambat yang disajikan pada gambar 4.72. RAO tertinggi dari *pitch* tertambat secara eksperimen sebesar 0.985 deg/m pada frekuensi 0.16 rad/s, namun di frekuensi 0.35 rad/s juga terdapat RAO cukup tinggi sebesar 0.740.

Tabel 4.49. Respon gerak dan RAO gerakan *pitch* hasil eksperimen.

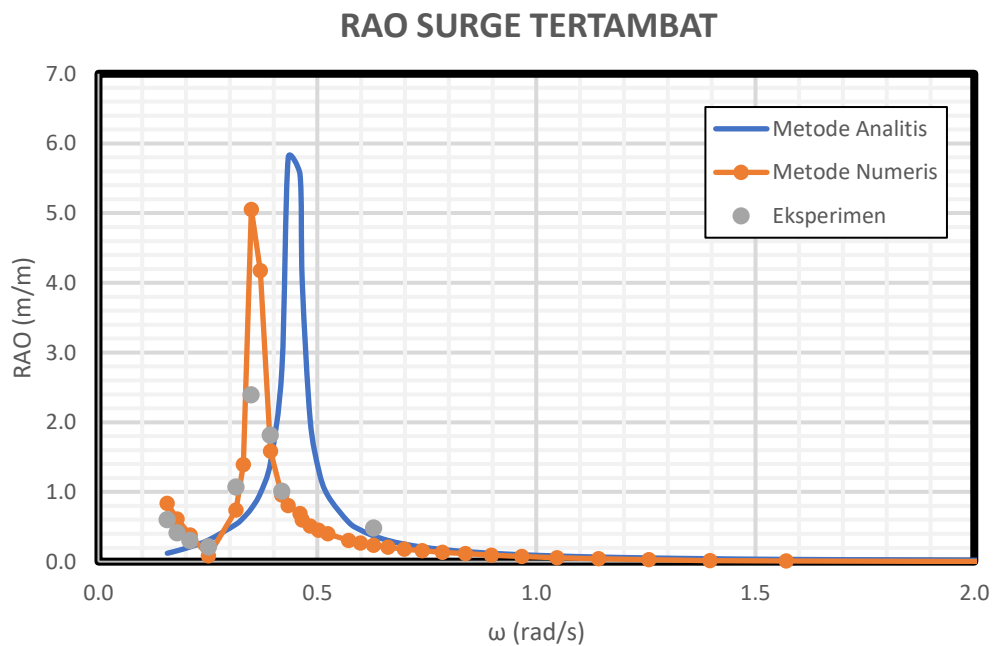
No.	KODE	Respon Gerak (cm)	Respon Periode (s)	RAO (deg/cm)	Perbandingan Periode
1	TT1	2,464	3,88	0,985	1,08
2	TT2	1,231	3,88	0,492	1,25
3	TT3	1,096	2,74	0,438	1,01
4	TT4	1,233	2,33	0,493	1,06
5	TT5	1,452	1,86	0,581	1,03
6	TT6	1,851	1,66	0,74	1,04
7	TT7	0,73	1,45	0,292	1,04
8	TT8	0,582	1,33	0,233	1,02
9	TT9	0,403	0,93	0,161	1,03



Gambar 4.72. Grafik RAO *pitch* tertambat eksperimen.

6.6.5. Perbandingan RAO Tertambat Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen

Gambar 4.73, 4.74 dan 4.75 menunjukkan perbandingan RAO terapan bebas pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode analitis, numeris dan eksperimen untuk tiap gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* yang terjadi.

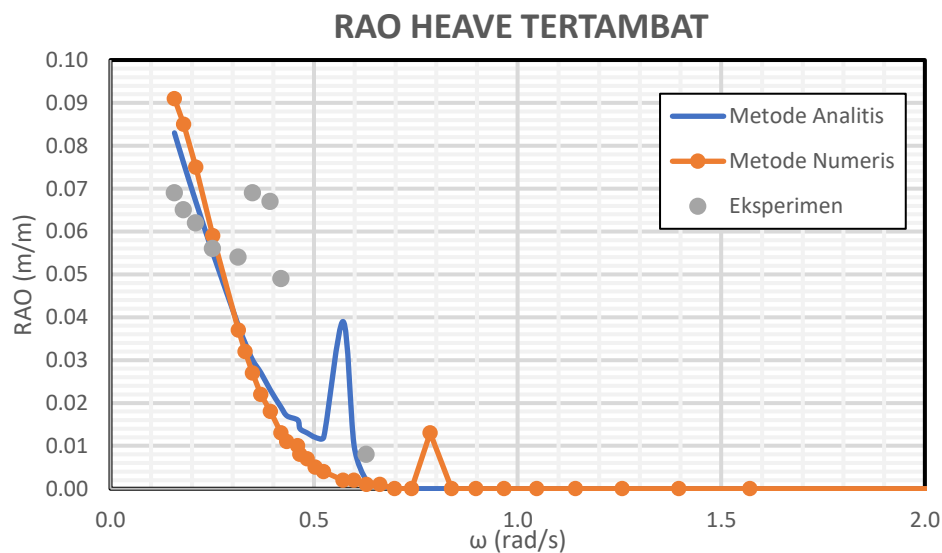


Gambar 4.73. Perbandingan RAO *surge* tertambat metode analitis, metode numeris dan eksperimen.

Tabel 4.50 menunjukkan perbandingan RAO *surge* dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Metode numeris dan metode eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama, 0.35 rad/s. RAO terbesar terjadi di perhitungan analitis sebesar 5.796 m/m.

Tabel 4.50. Perbandingan RAO *surge* tertambat.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Analitis	0.43	5.796
Numeris	0.35	5.053
Eksperimen	0.35	2.390

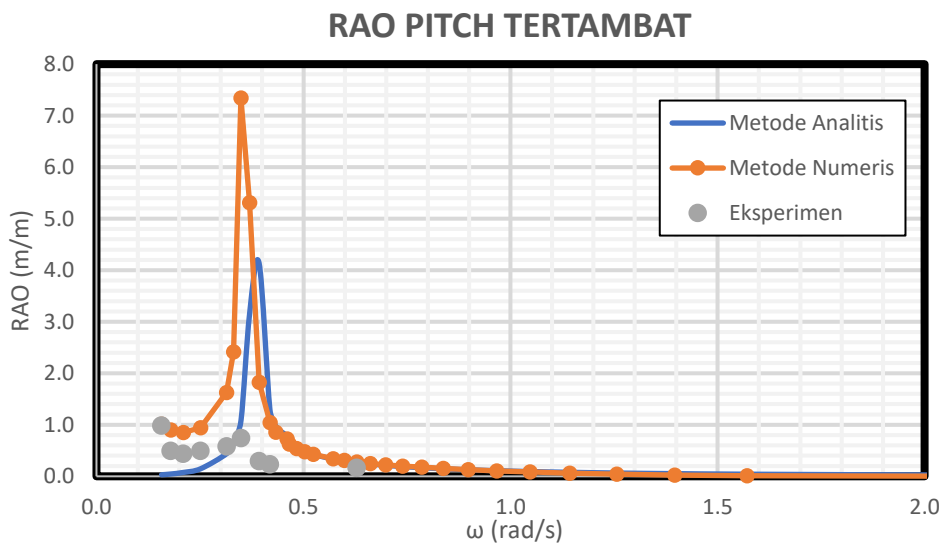


Gambar 4.74. Perbandingan RAO *heave* tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen.

Gerak *heave* tertambat terbesar dari setiap metode analisa ditampilkan dalam Tabel 4.51. Metode analitis menghasilkan nilai RAO paling tinggi dengan frekuensi di 0.16 rad/s. 3 metode memiliki nilai RAO terbesar di frekuensi yang sama, dengan RAO *surge* analitis sebesar 0.083 m/m numeris sebesar 0.091 m/m dan eksperimen sebesar 0.069 m/m.

Tabel 4.51. Perbandingan RAO *heave* tertambat.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Analitis	0.16	0.083
Numeris	0.16	0.091
Eksperimen	0.16	0.069



Gambar 4.75. Perbandingan RAO *pitch* tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen.

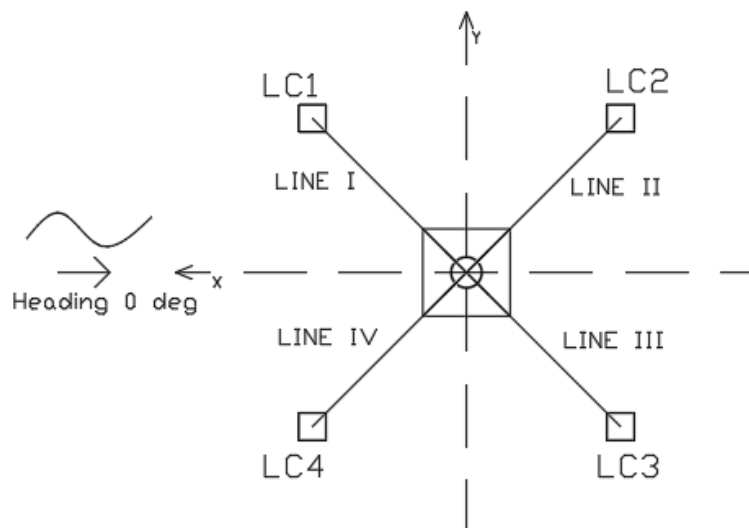
Gerak *pitch* terbesar dari setiap metode analisa ditampilkan dalam Tabel 4.52. Metode numeris menghasilkan nilai RAO paling tinggi sebesar 7.344 deg/m dengan frekuensi di 0.35 rad/s Metode numeris dan eksperimen memiliki nilai RAO terbesar di frekuensi yang sama di 0.35 rad/s , dengan RAO *pitch* analitis sebesar 4.138 deg/m dan eksperimen sebesar 0.740 deg/m.

Tabel 4.52. Perbandingan RAO *pitch* tertambat.

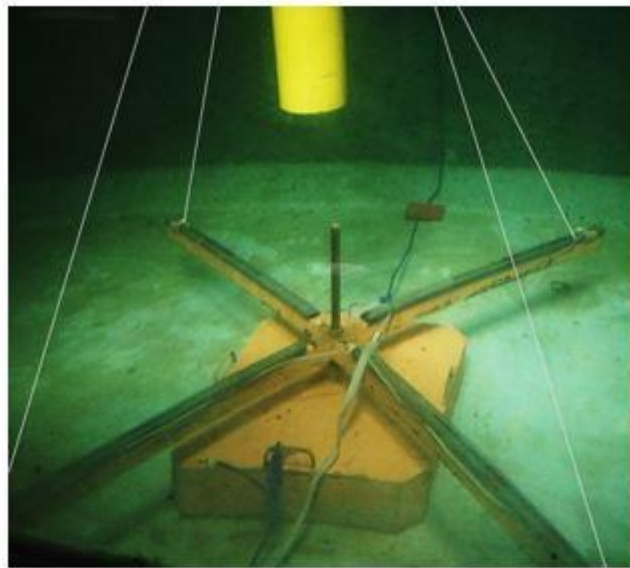
Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
Analitis	0.39	4.138
Numeris	0.35	7.344
Eksperimen	0.35	0.740

6.7. TEGANGAN TALI

Tali tambat pada struktur akan mengalami gaya tarik yang besarnya berosilasi sesuai dengan gaya gelombang yang terjadi. Besar gaya tegangan tali yang terjadi diukur dengan menggunakan dua metode yaitu metode numeris dan metode eksperimen. Tegangan tali yang diukur menggunakan metode numeris dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MOSES EDITOR 7, sedangkan untuk metode eksperimen tegangan tali diukur menggunakan instrumen *load cell* yang mampu mencatat gaya tarik yang terjadi pada tali tambat. Properties tali tambat yang digunakan mengacu pada Tabel 4.18. Gambar 4.76 merupakan posisi tali tambat yang digunakan pada model baik untuk metode numeris maupun metode eksperimen. Gambar 4.77 merupakan *load cell* yang berada di dasar air kolam uji Laboratorium Hidrodinamika ITS.



Gambar 4.76. Posisi *Line I, II, II dan IV*.



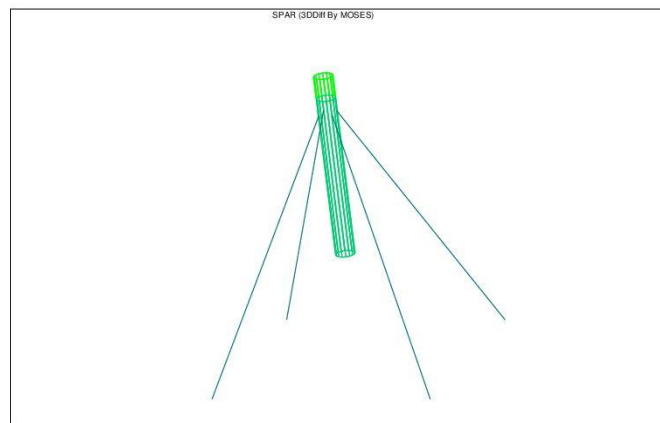
Gambar 4.77. Kondisi *Load Cell* dalam air

6.7.1. Metode Numeris

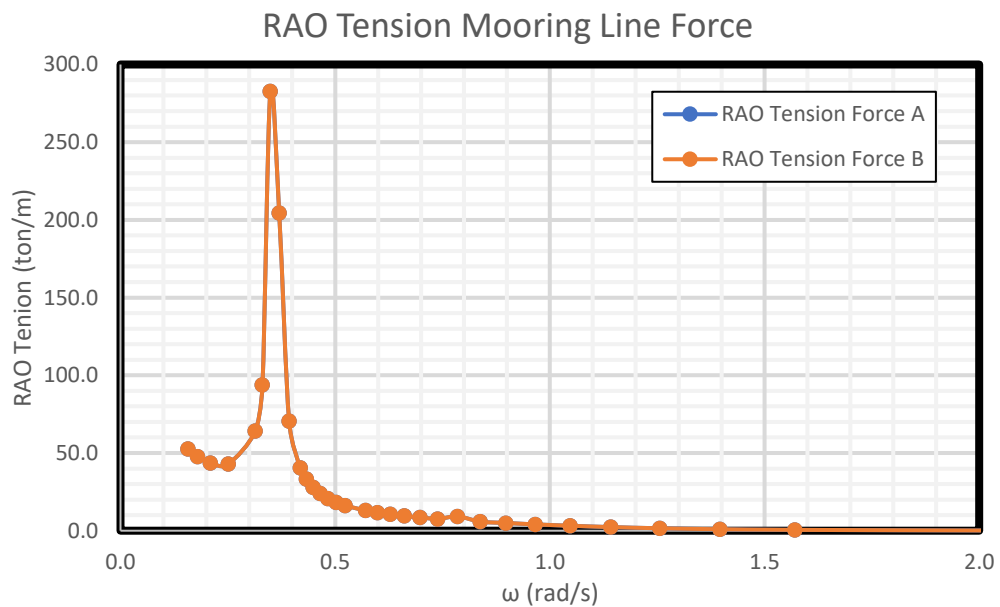
Tegangan tali yang terjadi pada struktur dianalisa menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES EDITOR 7. Properties tali tambat yang ada pada gambar 4.8 dan tabel 4.18 dimasukkan pada program MOSES EDITOR sehingga dihasilkan respon tegangan tali yang terjadi dalam bentuk RAO *Tension Force Mooring Line*. Gambar 4.78 berikut ini merupakan permodelan dari tali tambat yang digunakan pada model dengan menggunakan MOSES EDITOR. Gambar 4.79 dan 4.80 menunjukkan grafik hasil RAO *Tension Force* dari tiap tali tambat yang digunakan. Dari grafik dapat dilihat bahwa *Tension Force* yang terjadi pada tali tambat I dan tali tambat IV besarnya sama, sedangkan tali tambat II besarnya sama dengan tali tambat III namun lebih kecil dari tali tambat I dan IV. Tabel 4.53 menunjukkan tegangan maksimum pada tiap tali tambat dari hasil MOSES EDITOR.

Tabel 4.53. *Tension Force* maksimum tiap tali tambat pada MOSES.

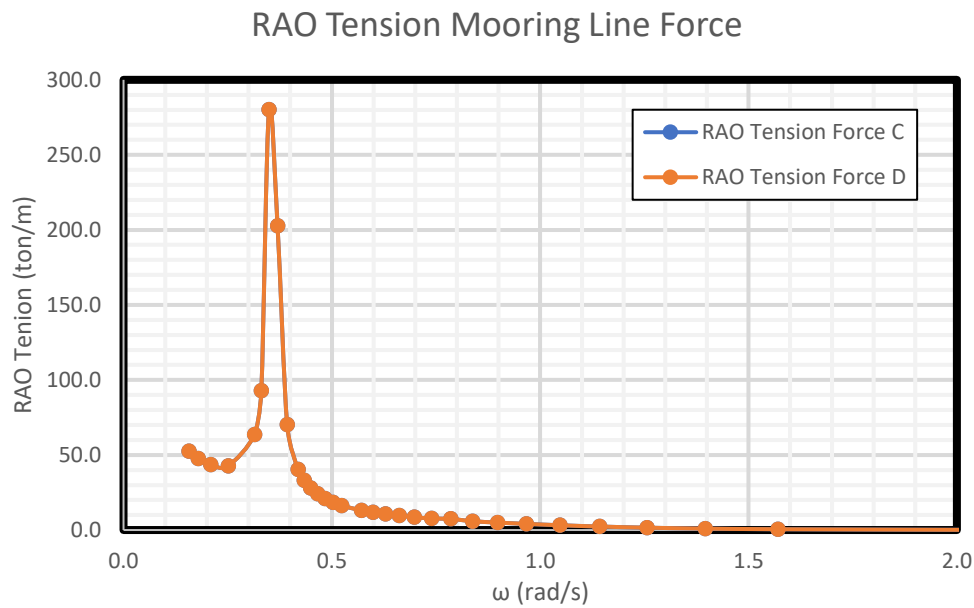
	Frequency (rad/s)	Tension Force (ton)
Mooring Line 1	0.349	282.87
Mooring Line 2	0.349	280.17
Mooring Line 3	0.349	280.17
Mooring Line 4	0.349	282.87



Gambar 4.78. Permodelan tali tambat dengan menggunakan MOSES EDITOR.



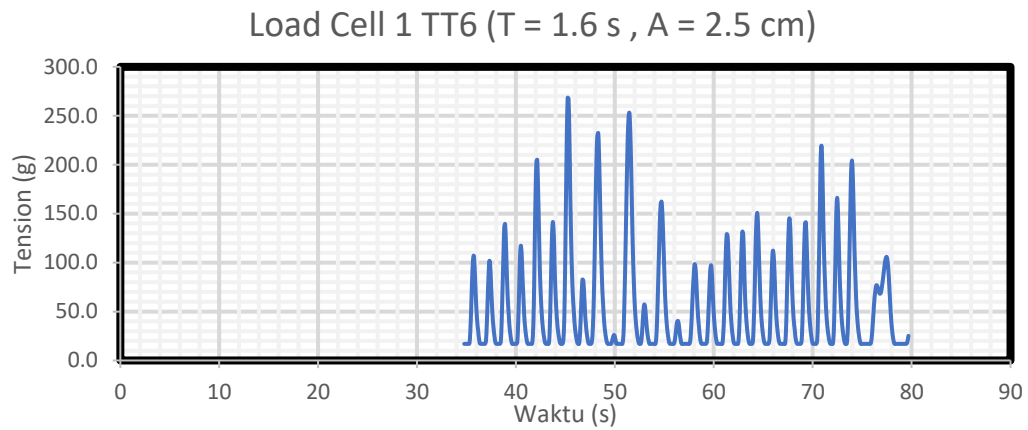
Gambar 4.79. RAO Tension tali tambat I dan IV metode numerik.



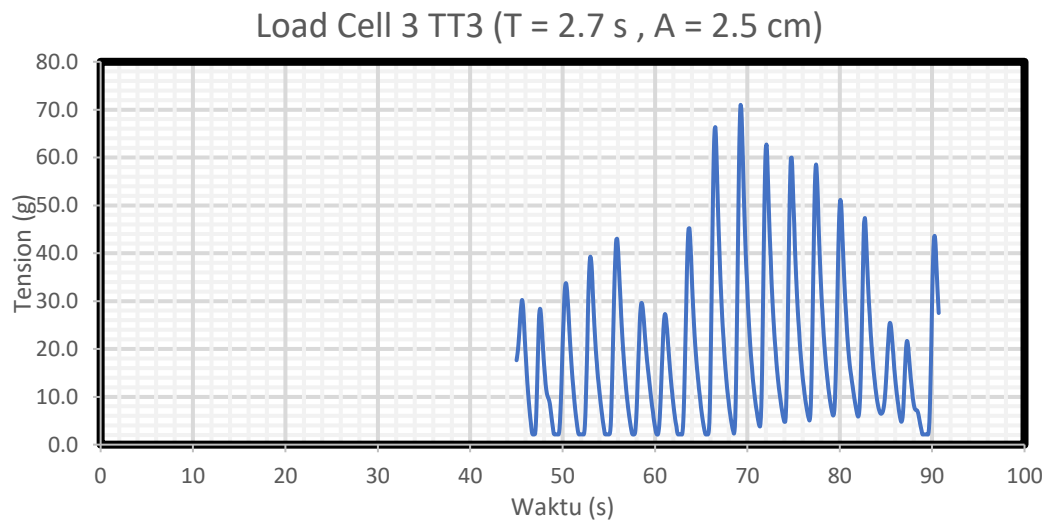
Gambar 4.80. RAO Tension tali tambat II dan III metode numerik.

6.7.2. Metode Eksperimen

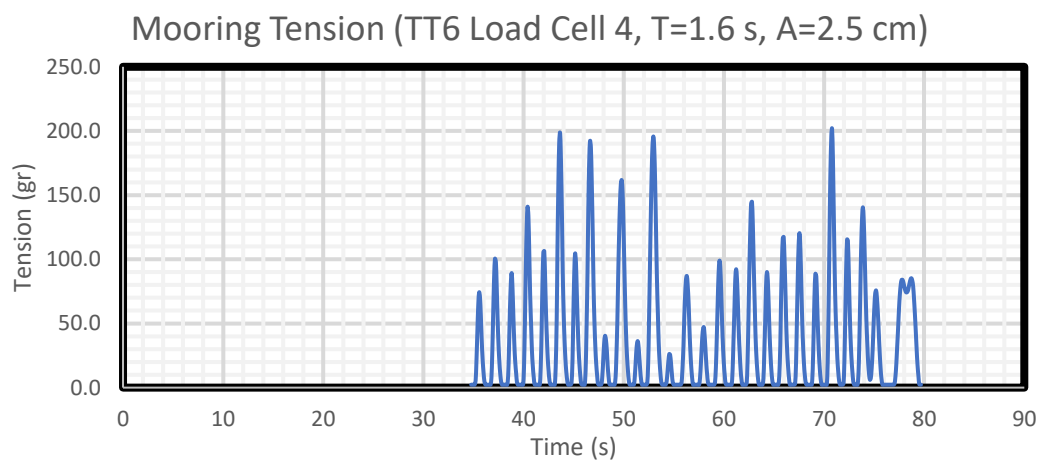
Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Model fisik diletakkan di kolam dengan dimensi panjang 100 m, kedalamann 1.8 m dan lebar 3 m. Pada kondisi tertambat model fisik diletakkan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.76 dengan menggunakan empat buah tali tambat. Load Cell dengan kapasitas beban tarik 5 kg digunakan pada tiap tali tambat yang dipasang pada model fisik. Model fisik akan diberi beban gelombang dengan arah 0 derajat yang berasal dari *wave maker* dan diberi beban 9 gelombang dengan karakteristik seperti pada Tabel 4.46. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan besar tinggi gelombang konstan. Respon tegangan tali tambat yang terjadi akibat beban gelombang akan dicatat dengan instrumen *load cell*. Gambar 4.81, 4.82, 4.83 merupakan salah satu contoh dari *time history* hasil dari instrumen *load cell*. Akan tetapi, pada tali tambat 2 *load cell* mengalami kerusakan sehingga menghasilkan data yang tidak akurat dan tidak dapat digunakan. Namun, hal ini tidak menjadi masalah karena tali tambat 2 dan tali tambat 3 yang letaknya simetri akan menghasilkan respon tegangan yang sama sehingga dapat diwakilkan dengan menggunakan hasil data pada *load cell* tali tambat 3.



Gambar 4.81. *Time history instrumen load cell tali tambat 1.*



Gambar 4.82. *Time History instrumen load cell tali tambat 3.*



Gambar 4.83. *Time history instrumen load cell tali tambat 4.*

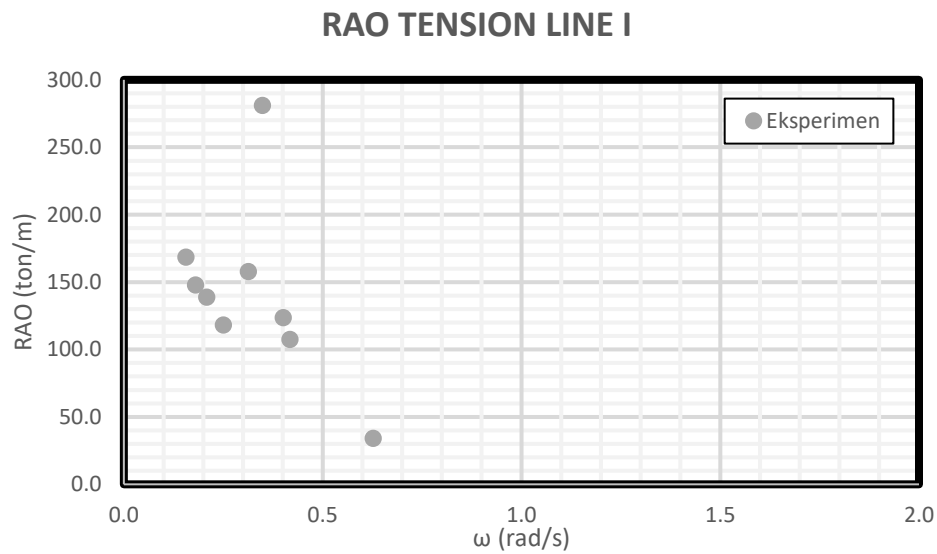
6.7.2.1. Load Cell 1

Setiap *time history* pada tension tali tambat *load cell* 1 dianalisa tinggi respon dan periode respon dengan merata-rata dari tegangan yang terjadi. RAO tegangan merupakan perbandingan amplitudo respon tension tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.54 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan periode respon tali tambat dari setiap gerakan beserta RAO *tension force* tali tambat dan perbandingan periode respon dengan periode gelombang.

Tabel 4.54. Data *load cell* 1 hasil eksperimen.

No.	KODE	Respon Tension (gr)	Respon Periode (s)	RAO Tension (ton/m)	Perbandingan Periode
1	TT1	27,456	3,88	168,34	1,08
2	TT2	24,08	3,32	147,64	1,07
3	TT3	22,607	2,91	138,61	1,08
4	TT4	19,226	2,33	117,88	1,06
5	TT5	25,727	1,86	157,74	1,03
6	TT6	45,808	1,52	280,86	1,05
7	TT7	20,12	1,37	123,36	0,98
8	TT8	17,501	1,42	107,30	1,09
9	TT9	5,527	0,85	33,89	1,05

Kolom RAO pada Tabel 4.54 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari tegangan tali tambat *Line I* yang disajikan pada Gambar 4.84.



Gambar 4.84. Grafik RAO tegangan tali tambat *load cell* 1 hasil eksperimen.

6.7.2.2. Load Cell 2

Load Cell 2 yang terpasang pada jangkar mengalami kerusakan saat pengambilan data, sehingga tidak terdapat data yang dapat dianalisa. Namun, representasi *load cell* 2 dapat diwakilkan oleh *load cell* 3, karena konfigurasi yang simetris.

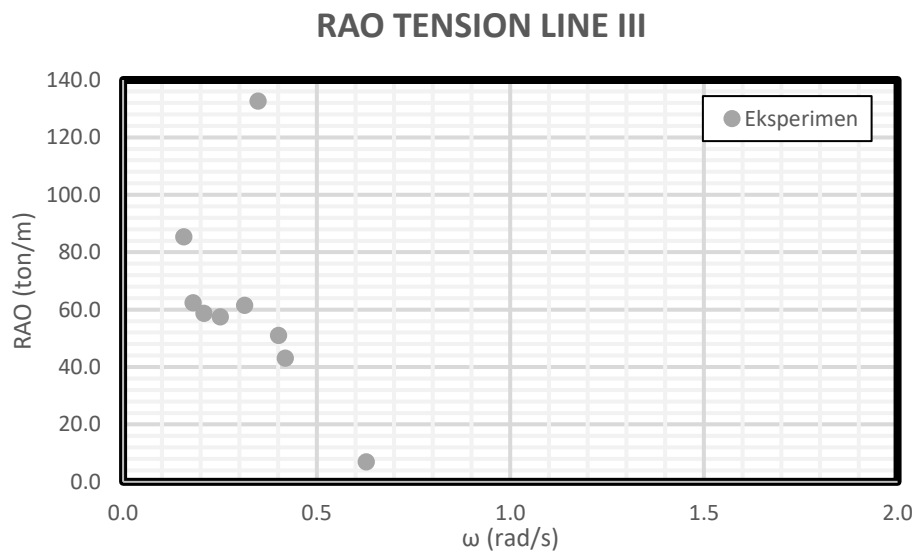
6.7.2.3. Load Cell 3

Setiap *time history* pada tension tali tambat *load cell* 3 dianalisa tinggi respon dan periode respon dari tegangan yang terjadi. RAO *tension force* merupakan perbandingan antara amplitudo respon tension tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.55 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan periode respon tali tambat dari setiap gerakan beserta RAO *tension force* tali tambat dan perbandingan periode respon dengan periode gelombang.

Tabel 4.55 Data *load cell* 3 hasil eksperimen.

No.	KODE	Respon Tension (gr)	Respon Periode (s)	RAO Tension (ton/m)	Perbandingan Periode
1	TT1	13,91	3,88	85,287	1,08
2	TT2	10,179	3,56	62,409	1,15
3	TT3	9,574	2,91	58,702	1,08
4	TT4	9,379	2,33	57,502	1,06
5	TT5	10,02	1,86	61,44	1,03
6	TT6	21,633	1,52	132,636	1,05
7	TT7	8,322	1,55	51,026	1,11
8	TT8	7,017	1,42	43,025	1,09
9	TT9	1,129	0,85	6,92	1,05

Kolom RAO pada Tabel 4.55 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari tegangan tali tambat 3 yang disajikan pada gambar 4.85.



Gambar 4.85. Grafik RAO tegangan tali tambat *load cell* 3 hasil eksperimen.

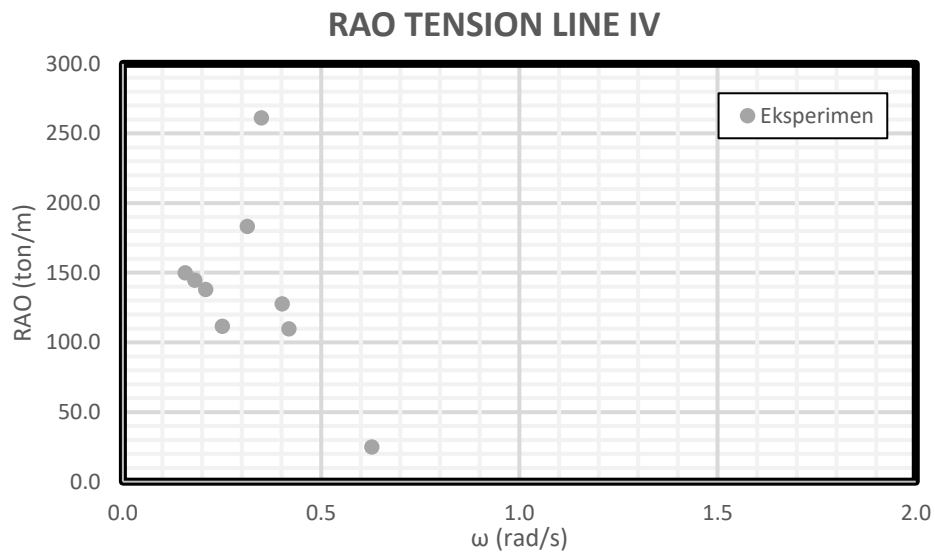
6.7.2.4. Load Cell 4

Setiap *time history* pada tegangan tali tambat *load cell* 4 dianalisa tinggi respon dan periode respon dengan merata-rata dari tegangan yang terjadi. *RAO tension force* merupakan perbandingan antara amplitudo respon tegangan tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.56 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan periode respon tali tambat dari setiap gerakan beserta *RAO tension force* tali tambat dan perbandingan periode respon dengan periode gelombang.

Tabel 4.56. Respon tegangan dan *RAO* tegangan tali tambat *load cell* 4 hasil eksperimen.

No.	KODE	Respon Tension (gr)	Respon Periode (s)	RAO Tension (ton/m)	Perbandingan Periode
1	TT1	24,45	3,88	149,91	1,08
2	TT2	23,598	3,05	144,683	0,98
3	TT3	22,491	2,91	137,901	1,08
4	TT4	18,181	2,33	111,472	1,06
5	TT5	29,88	1,86	183,199	1,03
6	TT6	42,584	1,52	261,090	1,05
7	TT7	20,817	1,45	127,634	1,04
8	TT8	17,869	1,42	109,558	1,09
9	TT9	4,043	0,85	24,791	1,05

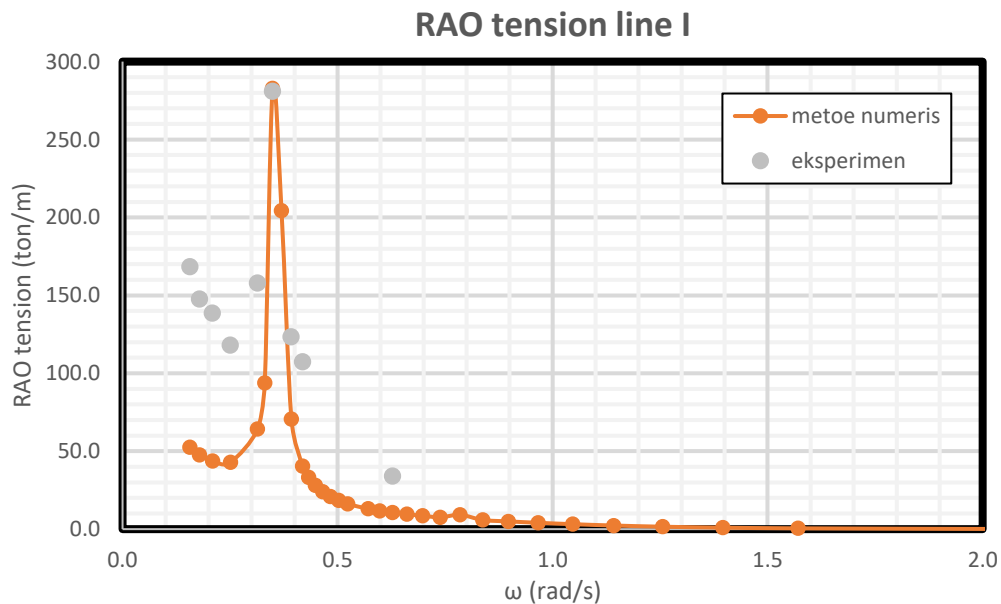
Kolom *RAO* pada Tabel 4.56 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik *RAO* dari tegangan tali tambat 4 yang disajikan pada gambar 4.86.



Gambar 4.86. Grafik RAO tegangan tali tambat *load cell* 4 hasil eksperimen.

6.7.3. Perbandingan RAO Tegangan Tertambat Metode Analitis, Numeris dan Eksperimen

Gambar 4.87; 4.88; 4.89 dan 4.90 menunjukkan perbandingan RAO Tali Tambat dari metode numerik dan metode eksperimen dari setiap *line* dengan arah gelombang 0 derajat.

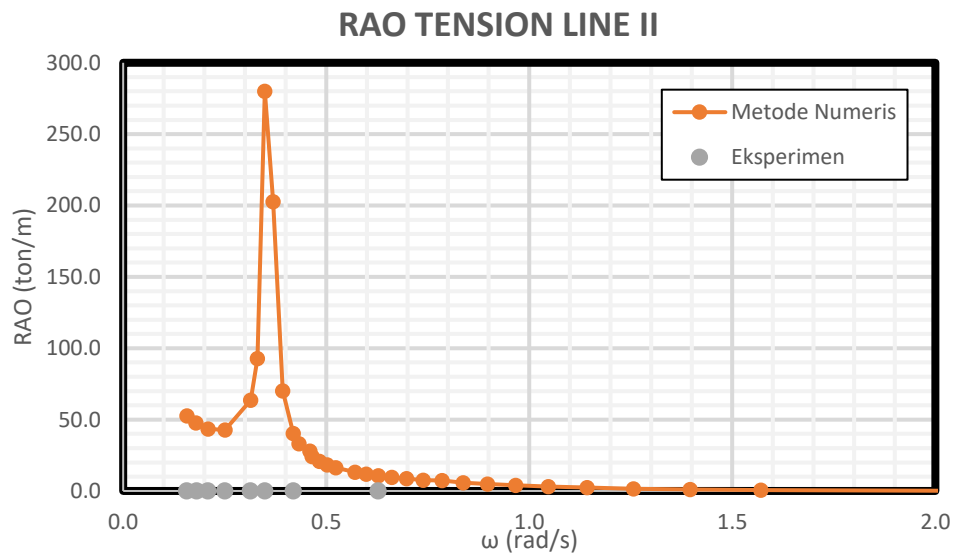


Gambar 4.87. Perbandingan RAO *Tension line* I tertambat metode numeris dan eksperimen.

Tegangan tali pada *Line I* dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.57. Metode numeris menghasilkan RAO yang lebih besar (282.86 ton) daripada RAO eksperimen (280.863 ton). Namun, keduanya berada di frekuensi yang sama yaitu 0.349 rad/s.

Tabel 4.57. Perbandingan *Tension Line I*.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.349	282.860
Eksperimen	0.349	280.863

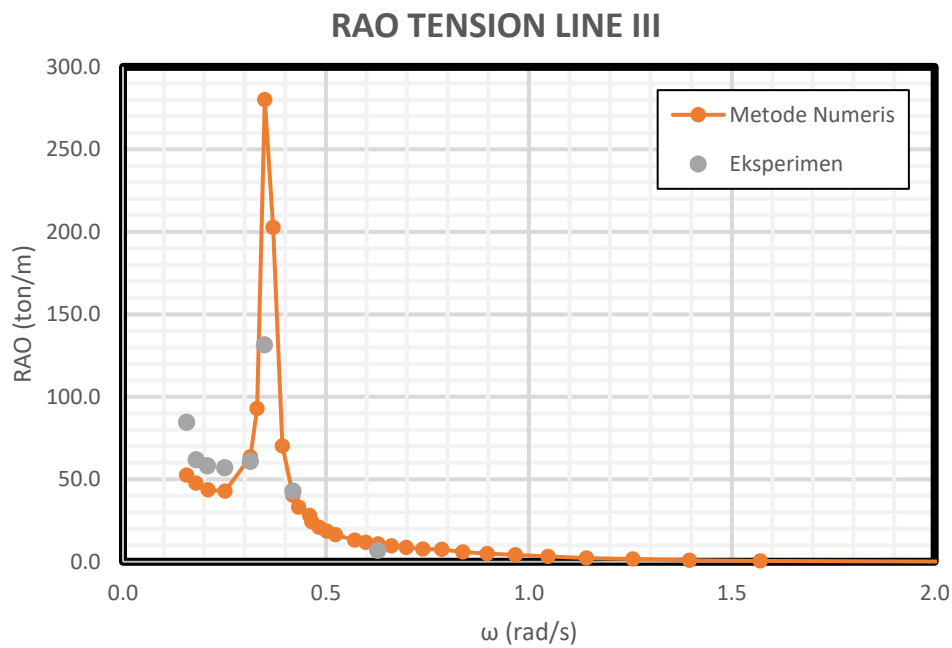


Gambar 4.88. Perbandingan RAO *Tension line II* tertambat metode numeris dan eksperimen.

Tegangan tali pada *Line II* dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.58. Pada *Line II*, *load cell* mengalami kerusakan sehingga tidak ada data yang dapat dianalisa. Metode numeris menghasilkan RAO sebesar 280.180 ton di frekuensi yang sama yaitu 0.349 rad/s.

Tabel 4.58. Perbandingan *Tension Line II*.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.349	280.180
Eksperimen	-	-

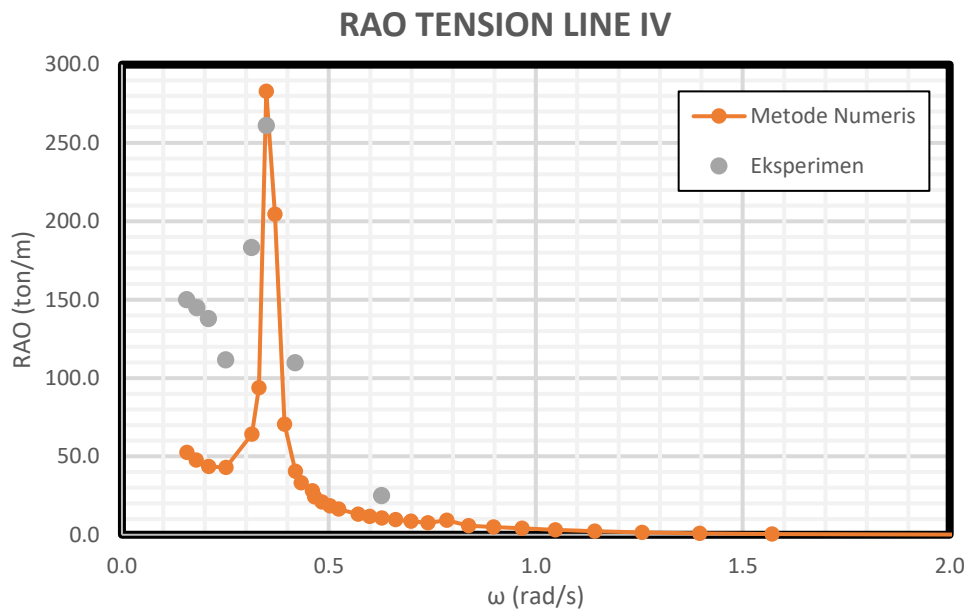


Gambar 4.89. Perbandingan RAO *Tension line* III tertambat metode numeris dan eksperimen.

Tegangan tali pada *Line* III dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.59. Metode numeris menghasilkan RAO yang lebih besar (280.170 ton) daripada RAO eksperimen (132.636 ton). Namun, keduanya berada di frekuensi yang sama yaitu 0.349 rad/s.

Tabel 4.59. Perbandingan *Tension Line* III.

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.349	280.170
Eksperimen	0.349	132.636



Gambar 4.90. Perbandingan RAO *Tension line IV* tertambat metode numeris dan eksperimen.

Tegangan tali pada *Line IV* dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.60. Metode numeris menghasilkan RAO yang lebih besar (280.17 ton) daripada RAO eksperimen (132.636 ton). Namun, keduanya berada di frekuensi yang sama yaitu 0.349 rad/s.

Tabel 4.60. Perbandingan *Tension Line IV*.

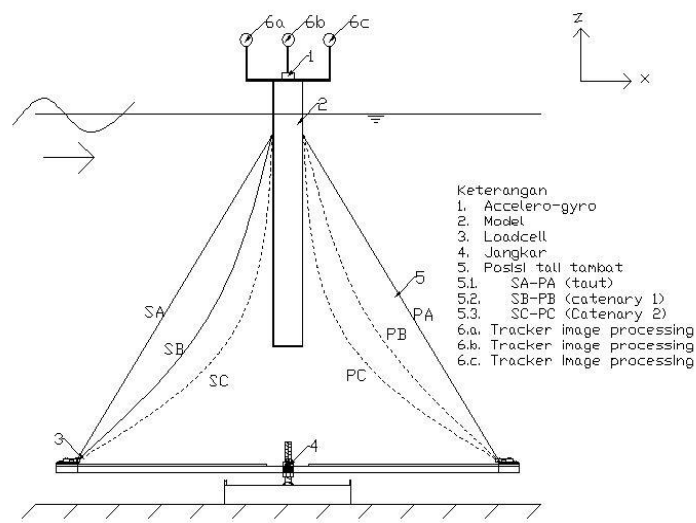
Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.349	280.170
Eksperimen	0.349	132.636

6.8. VARIASI KONFIGURASI TALI

Dalam penelitian ini dilakukan variasi konfigurasi tali (*taut*, *catenary* 1, dan *catenary* 2) dari sistem tambat yang digunakan pada model SPAR. Variasi dilakukan dengan menambah panjang dari tali tambat namun tetap pada lokasi titik tambat yang sama. Gambar 4.91. di bawah ini menggambarkan variasi konfigurasi tali yang akan dilakukan dan tabel 4.61. merupakan data-data dari variasi yang akan dilakukan. Hasil yang diharapkan dari analisa variasi konfigurasi tali ini adalah perbandingan dan efek dari penambahan panjang tali tambat terhadap perilaku gerak model SPAR dan tegangan tali tambat yang terjadi.

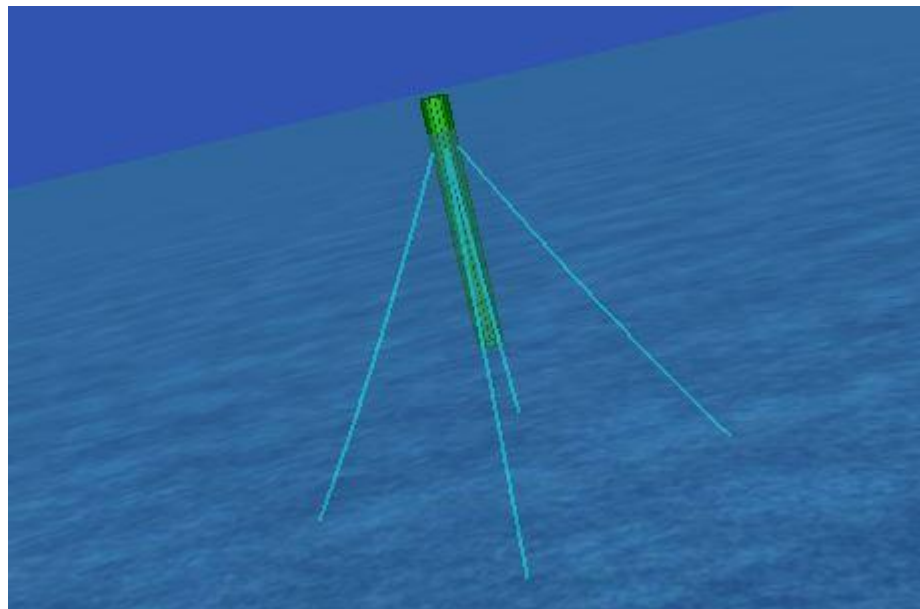
Tabel 4.61. Properties variasi konfigurasi tali

DESKRIPSI	PROTOTYPE SPAR (JIP,1995)		MODEL EKSPERIMEN	
	Besaran	Satuan	Besaran	Satuan
<u>Mooring System</u>				
Diameter tali	115	mm	0.62	Mm
Kedalaman jangkar	226.8	m	181.4	Cm
Posisi horizontal jangkar	122.3	m	98	Cm
Kedalaman Posisi <i>Fairlead</i> (ditinjau dari <i>draft</i>)	12.74	m	10.2	Cm
Panjang Tali <i>Taut</i>	225	m	1.8	M
Panjang Tali <i>Catenary</i> 1	231.25	m	1.85	M
Panjang Tali <i>Catenary</i> 2	240	m	1.92	M
Kekakuan <i>mooring</i> (EA)	1175	MN	603.814	N

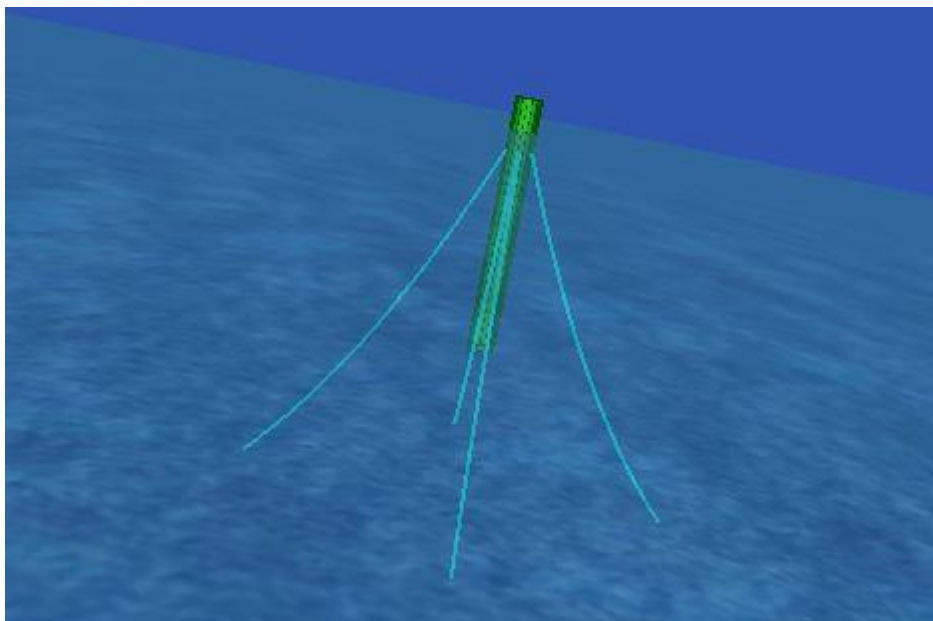


Gambar 4.91. Variasi konfigurasi tali yang dilakukan pada sistem tambat model SPAR

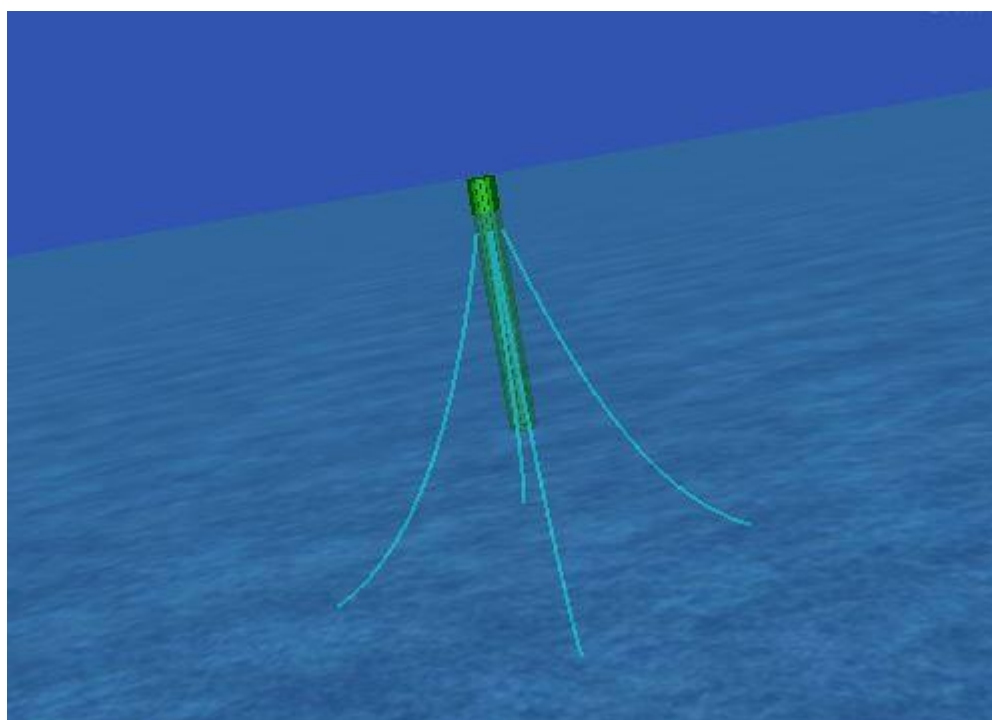
Analisa konfigurasi tali dilakukan dengan metode numerik menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES EDITOR 7. Permodelan tali tambat untuk tiap konfigurasi tali pada MOSES EDITOR ditunjukkan pada gambar 4.92, 4.93 dan 4.94. Kemudian, dihasilkan RAO gerak dari setiap variasi konfigurasi tali dan RAO tension dari tali tambat yang digunakan.



Gambar 4.92. Pemodelan konfigurasi tali sistem tambat tipe *taut* model SPAR pada MOSES EDITOR

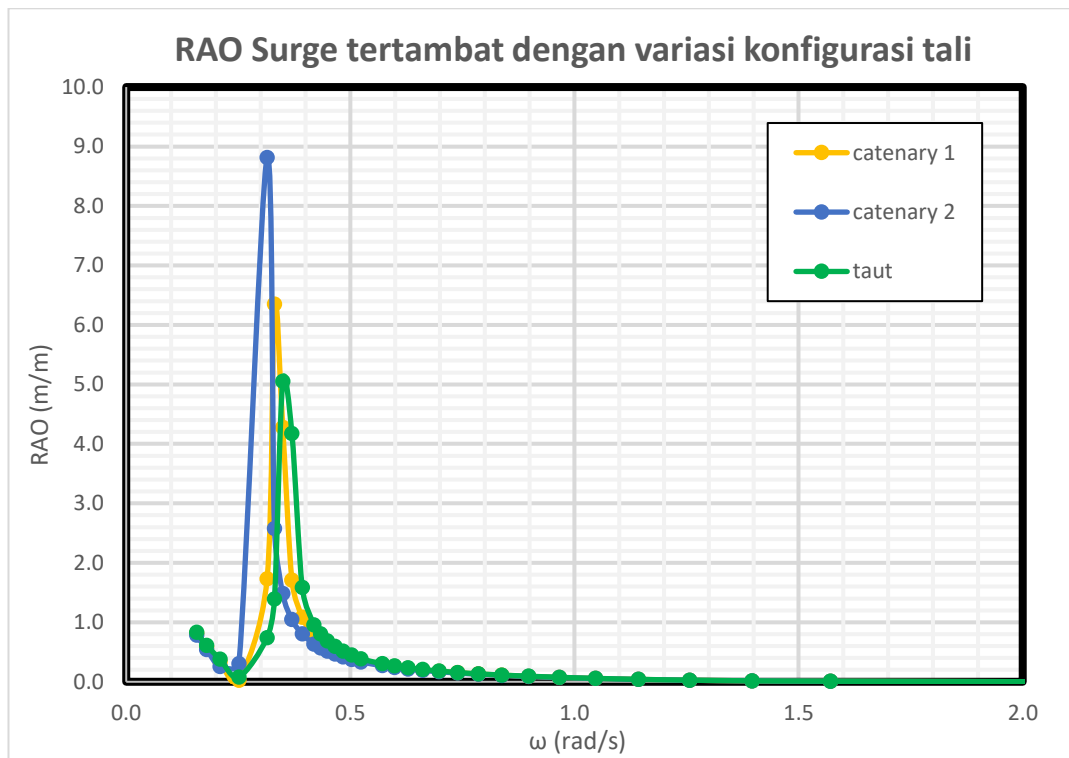


Gambar 4.93. Pemodelan konfigurasi tali sistem tambat tipe *catenary* 1 model SPAR pada MOSES EDITOR



Gambar 4.94. Pemodelan konfigurasi tali sistem tambat tipe *catenary* 2 model SPAR pada MOSES EDITOR

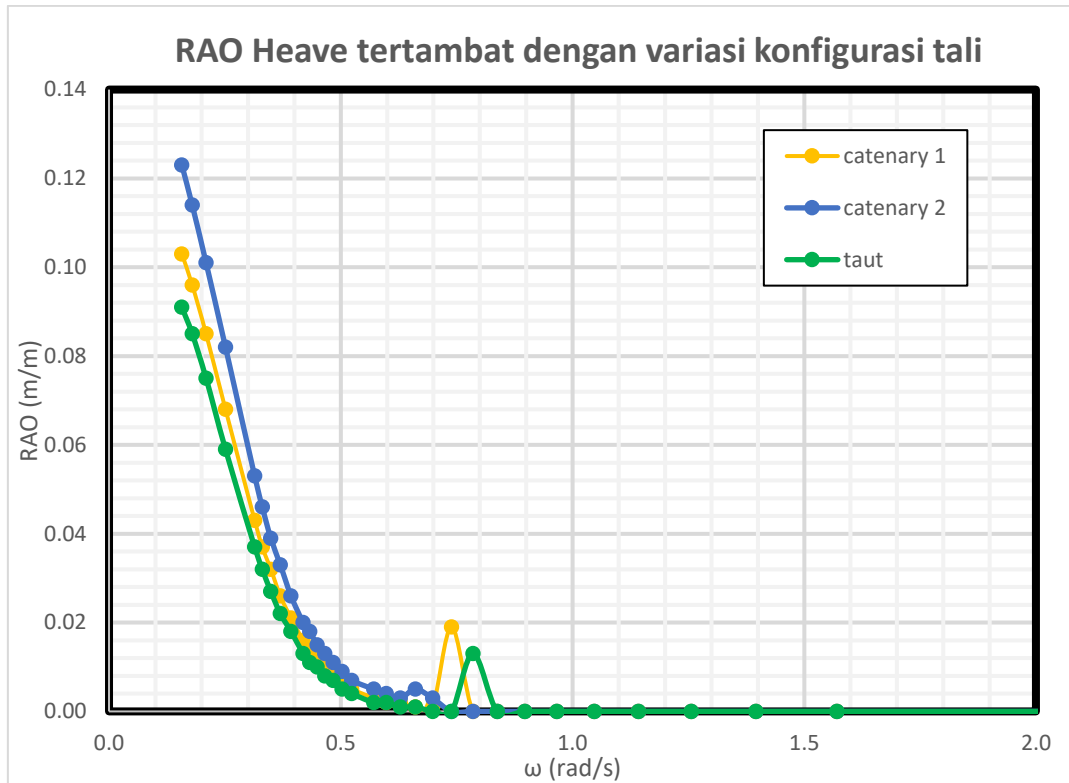
Dari hasil analisa numerik didapatkan perbandingan RAO gerak dan RAO tension dari tiap variasi konfigurasi tali seperti pada gambar 4.95; gambar 4.96; gambar 4.97; gambar 4.98; gambar 4.99 dan gambar 4.100. Nilai RAO maksimum dari tiap RAO gerak dan RAO tension variasi yang ditinjau ditunjukkan pada tabel 4.62; tabel 4.63; tabel 4.64; dan tabel 4.65 sebagai berikut :



Gambar 4.95. Perbandingan hasil RAO gerak *surge* model SPAR kondisi tertambat dengan variasi konfigurasi tali secara numeris menggunakan MOSES EDITOR

Tabel 4.62. Perbandingan RAO tertambat gerak *surge* maksimum tiap variasi konfigurasi tali

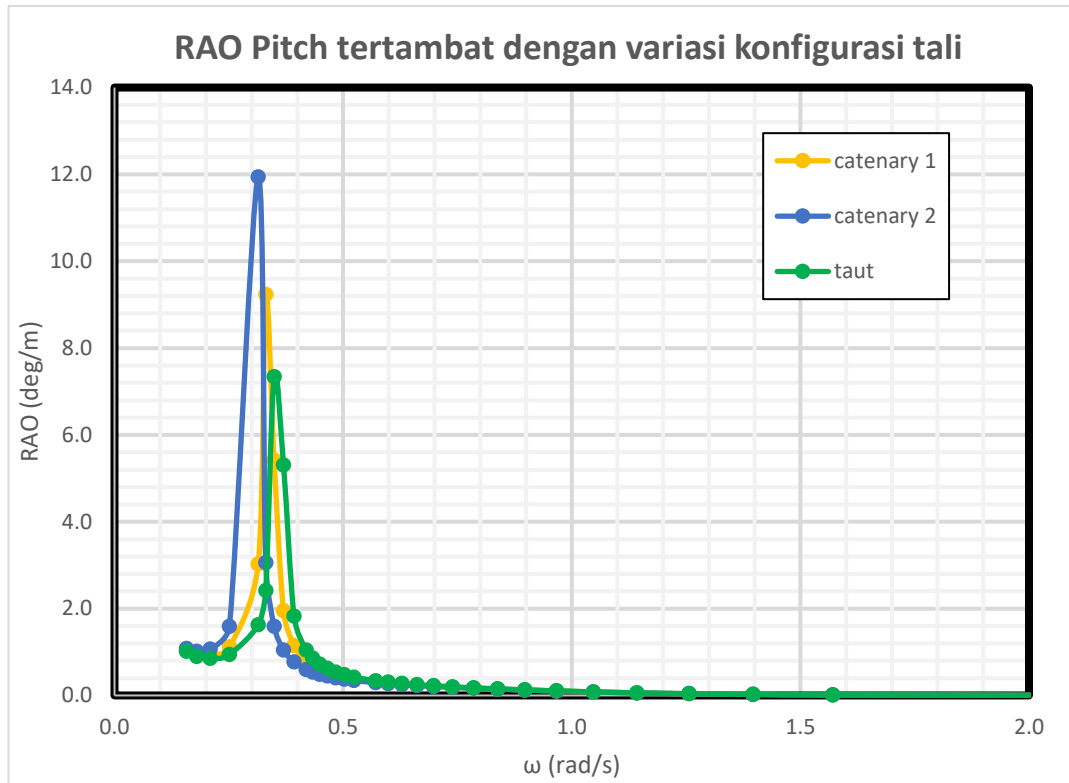
METODE	Surge	
	Tertambat	
	RAO (m/m)	Frek (Rad/s)
<i>Taut</i>	5.05	0.35
<i>Catenary 1</i>	6.35	0.33
<i>Catenary 2</i>	8.82	0.31



Gambar 4.96. Perbandingan hasil RAO gerak *heave* model SPAR kondisi tertambat dengan variasi konfigurasi tali secara numeris menggunakan MOSES EDITOR

Tabel 4.63. Perbandingan RAO tertambat gerak *heave* maksimum tiap variasi konfigurasi tali

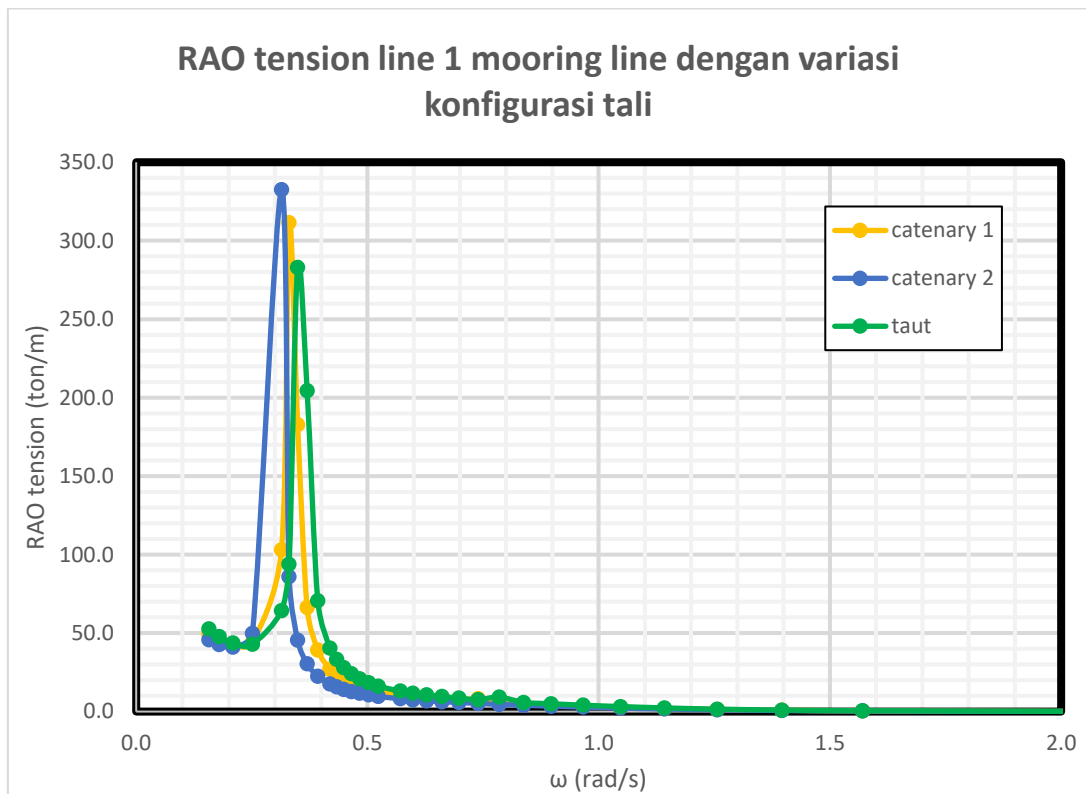
METODE	Heave	
	Tertambat	
	RAO (m/m)	Frek (Rad/s)
<i>Taut</i>	0.091	0.16
<i>Catenary 1</i>	0.103	0.16
<i>Catenary 2</i>	0.123	0.16



Gambar 4.97. Perbandingan hasil RAO gerak *pitch* model SPAR kondisi tertambat dengan variasi konfigurasi tali secara numeris menggunakan MOSES EDITOR

Tabel 4.64. Perbandingan RAO tertambat gerak *pitch* maksimum tiap variasi konfigurasi tali

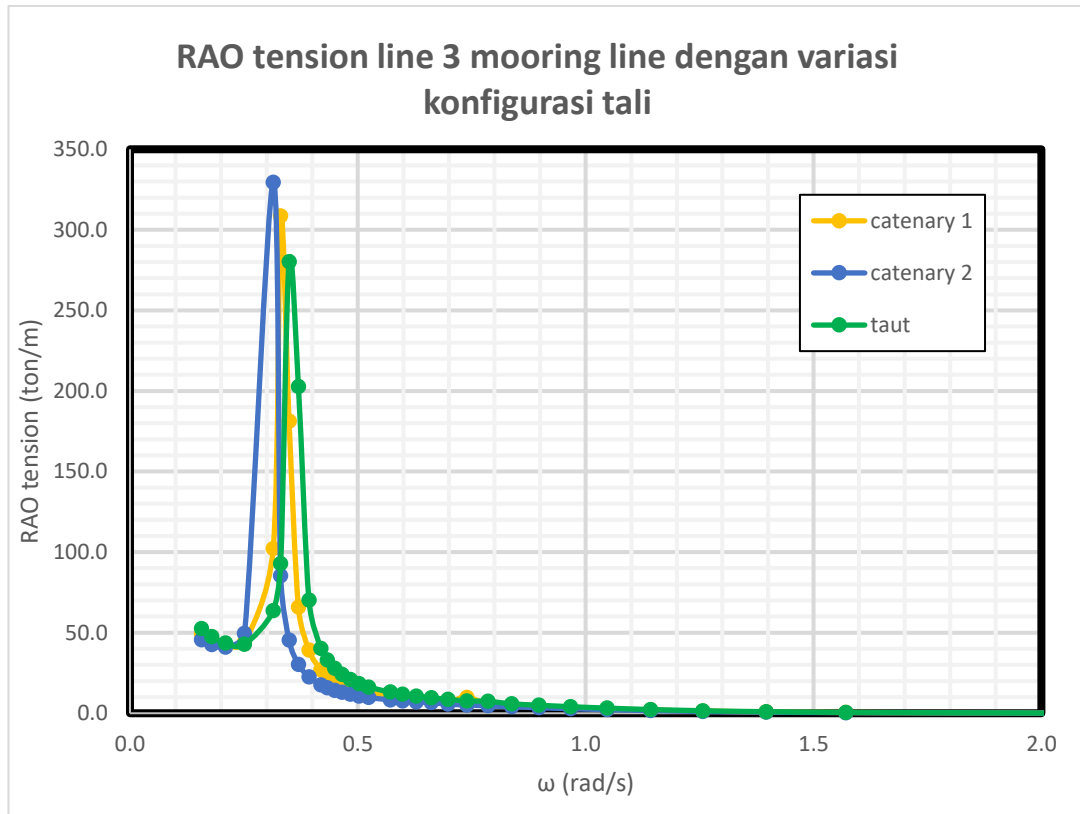
METODE	Pitch	
	Tertambat	
	RAO (deg/m)	Frek (Rad/s)
<i>Taut</i>	7.34	0.35
<i>Catenary 1</i>	9.24	0.33
<i>Catenary 2</i>	11.94	0.31



Gambar 4.98. Perbandingan hasil RAO tension Line 1 model SPAR dengan variasi konfigurasi tali secara numeris menggunakan MOSES EDITOR

Tabel 4.65. Perbandingan RAO *tension line* 1 maksimum tiap variasi konfigurasi tali

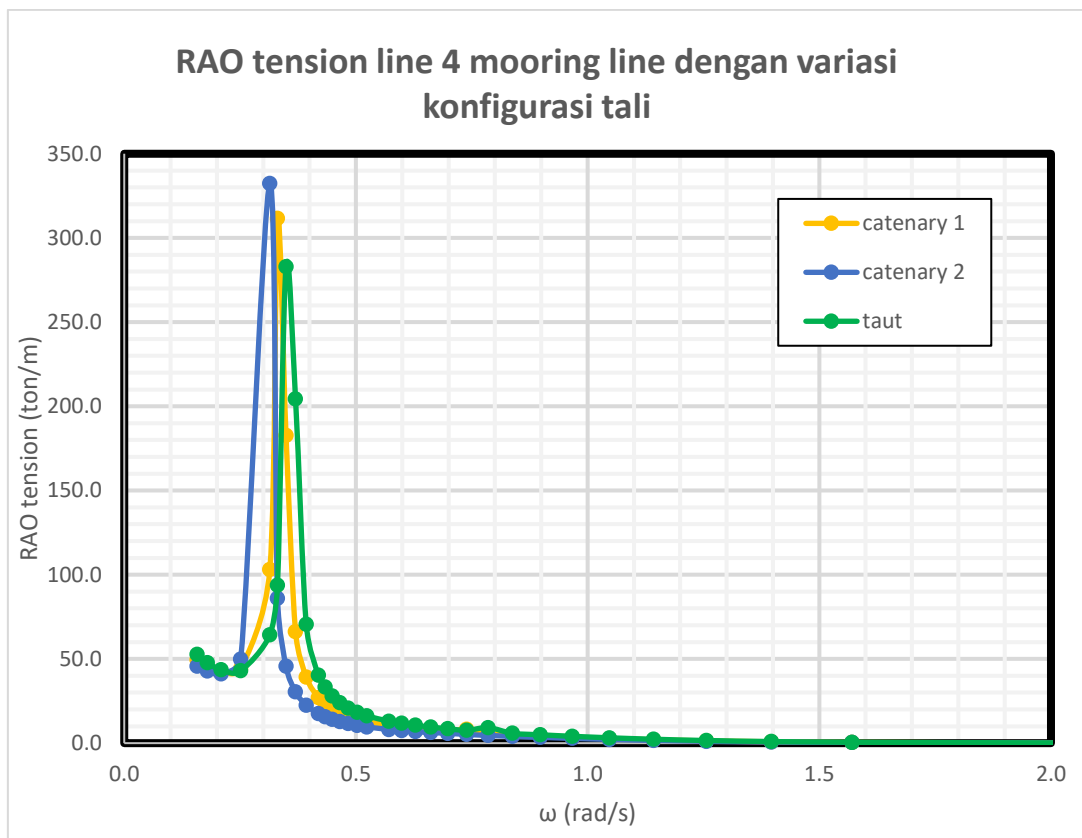
METODE	Line 1	
	Tertambat	
	RAO (ton/m)	Frek (Rad/s)
<i>Taut</i>	282.87	0.35
<i>Catenary 1</i>	311.55	0.33
<i>Catenary 2</i>	332.43	0.31



Gambar 4.99. Perbandingan hasil RAO tension Line 3 model SPAR dengan variasi konfigurasi tali secara numeris menggunakan MOSES EDITOR

Tabel 4.66. Perbandingan RAO *tension line 3* maksimum tiap variasi konfigurasi tali

METODE	Line 3	
	Tertambat	
	RAO (ton/m)	Frek (Rad/s)
<i>Taut</i>	280.17	0.35
<i>Catenary 1</i>	308.53	0.33
<i>Catenary 2</i>	329.48	0.31



Gambar 4.100. Perbandingan hasil RAO tension Line 4 model SPAR dengan variasi konfigurasi tali secara numeris menggunakan MOSES EDITOR

Tabel 4.67. Perbandingan RAO *tension line 4* maksimum tiap variasi konfigurasi tali

METODE	Line 4	
	Tertambat	
	RAO (ton/m)	Frek (Rad/s)
<i>Taut</i>	282.87	0.35
<i>Catenary 1</i>	311.55	0.33
<i>Catenary 2</i>	332.43	0.31

Dari hasil analisa secara numerik variasi konfigurasi tali diatas didapatkan bahwa semakin bertambahnya panjang tali menyebabkan gerak *surge*, *heave* dan *pitch* semakin membesar dan juga frekuensi natural dari ketiga gerak tersebut semakin mengecil. Hal ini disebabkan karena semakin panjang tali kekakuan dari tali tambat tersebut semakin berkurang dan juga semakin panjang tali semakin menambah massa tali tersebut. Sementara itu untuk tension tali yang terjadi, semakin panjang tali tambat semakin besar *tension* yang terjadi pada tali hal ini disebabkan karena gerak yang terjadi lebih besar dan juga massa dari tali menambah gaya yang bekerja. Dapat disimpulkan bahwa *taut mooring* memberikan respon gerak dan respon *tension* yang lebih kecil dibandingkan dengan *catenary mooring*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Gerakan *heave* model SPAR dalam kondisi *free floating* mengalami resonansi pada periode gelombang eksperimen 2,2 detik (25 detik untuk periode gelombang asli) sesuai dengan analisa secara analitis dan numerik. Nilai RAO gerak *heave* maksimum yang terjadi adalah :

- Ditinjau secara eksperimen, RAO *heave* maksimum sebesar 3,99 m/m pada frekuensi 0,25 rad/s
- Ditinjau secara numerik, RAO *heave* maksimum sebesar 4,28 m/m pada frekuensi 0,25 rad/s.
- Ditinjau secara analitis, RAO *heave* maksimum sebesar 3,77 m/m pada frekuensi 0,25 rad/s.

Sedangkan ketika model SPAR dalam keadaan tertambat (*taut*), gerak *heave* yang terjadi berkurang secara signifikan. RAO maksimum gerak *heave* yang terjadi mengecil menjadi berkisar antara 0,1 m/m pada frekuensi 0,16 rad/s ditinjau secara analitis, numerik dan eksperimen.

2. Gerakan *surge* model SPAR eksperimen dalam kondisi tertambat (*taut*) mengalami resonansi pada periode gelombang eksperimen 1,6 detik (18 detik untuk periode gelombang asli) sedangkan pada saat kondisi *free floating* tidak mengalami resonansi hal ini disebabkan karena tali tambat memberikan kekakuan terhadap gerak *surge* model sehingga gerak *surge* memiliki periode natural gerak. Nilai RAO tertambat gerak *surge* maksimum yang terjadi adalah :

- Ditinjau secara eksperimen, RAO *surge* tertambat maksimum sebesar 2,39 m/m pada frekuensi 0,35 rad/s.

- Ditinjau secara numerik, RAO *surge* tertambat maksimum sebesar 5,05 m/m pada frekuensi 0,35 rad/s.
 - Ditinjau secara analitis, RAO *surge* tertambat maksimum sebesar 5,78 m/m pada frekuensi 0,43 rad/s.
3. Gerakan *pitch* model SPAR eksperimen dalam kondisi *free floating* berbeda dengan analisa secara analitis dan numerik karena adanya tali penahan *drift* yang digunakan pada saat eksperimen mempengaruhi gerak *pitch* yang terjadi. Sedangkan, dalam kondisi tertambat (*taut*) RAO gerak *pitch* maksimum yang terjadi adalah :
- Ditinjau secara eksperimen, RAO *pitch* tertambat maksimum sebesar 0,74 degree/m pada frekuensi 0,35 rad/s.
 - Ditinjau secara numerik, RAO *pitch* tertambat maksimum sebesar 7,34 degree/m pada frekuensi 0,35 rad/s.
 - Ditinjau secara analitis, RAO *pitch* tertambat maksimum sebesar 4,14 degree/m pada frekuensi 0,39 rad/s.

RAO *pitch* maksimum yang terjadi ditinjau secara eksperimen jauh lebih kecil dibandingkan dengan secara numerik dan analitis hal ini disebabkan karena dalam eksperimen ini tidak dilakukan *decay test* yang berguna untuk mengetahui besarnya redaman yang terjadi pada model SPAR.

4. *Tension* tali sistem tambat model SPAR eksperimen memiliki tren RAO *tension* yang sama dengan analisa secara numerik namun terjadi sedikit perbedaan pada nilai RAO maksimum di *line* 3 namun masih pada frekuensi yang sama. RAO *tension* maksimum yang terjadi pada tiap *line* adalah sebagai berikut :
- Pada *line* 1, RAO *tension* maksimum hasil eksperimen didapatkan 280,86 ton/m pada frekuensi 0,35 rad/s sedangkan dari hasil numerik didapatkan 282,87 ton/m pada frekuensi yang sama.
 - Pada *line* 3, RAO *tension* maksimum hasil eksperimen didapatkan 132,64 ton/m pada frekuensi 0,35 rad/s sedangkan

dari hasil numerik didapatkan 280,17 ton/m pada frekuensi yang sama.

- Pada line 4, RAO tension maksimum hasil eksperimen didapatkan 261,09 ton/m pada frekuensi 0,35 rad/s sedangkan dari hasil numerik didapatkan 282,87 ton/m pada frekuensi yang sama.

5. Sistem tambat *taut mooring* memberikan respon gerak yang lebih kecil dibandingkan dengan *catenary mooring*. Selain itu, semakin panjang tali frekuensi natural gerak model menjadi lebih kecil karena kekakuan dari tali semakin kecil dan massanya juga ikut bertambah. Nilai RAO gerak maksimum yang terjadi pada SPAR dengan variasi konfigurasi tali adalah sebagai berikut :

- RAO gerak *surge* maksimum *taut mooring* sebesar 5,05 m/m pada frekuensi 0,35 rad/s; *catenary mooring 1* sebesar 6,35 m/m pada frekuensi 0,33 rad/s dan *catenary mooring 2* sebesar 8,82 m/m pada frekuensi 0,31 rad/s.
- RAO gerak *heave* maksimum *taut mooring* sebesar 0,091 m/m pada frekuensi 0,16 rad/s; *catenary mooring 1* sebesar 0,103 m/m pada frekuensi 0,16 rad/s dan *catenary mooring 2* sebesar 0,123 m/m pada frekuensi 0,16 rad/s.
- RAO gerak *pitch* maksimum *taut mooring* sebesar 7,34 m/m pada frekuensi 0,35 rad/s; *catenary mooring 1* sebesar 0,103 m/m pada frekuensi 0,16 rad/s dan *catenary mooring 2* sebesar 0,123 m/m pada frekuensi 0,16 rad/s.

6. *Tension* tali pada sistem tambat *catenary mooring* lebih besar dibandingkan dengan *taut mooring* karena respon gerak yang terjadi lebih besar dan pertambahan panjang tali menambah gaya berat pada tali. Nilai RAO *tension* maksimum yang terjadi pada tiap *mooring line* sistem tambat SPAR dengan variasi konfigurasi tali adalah sebagai berikut :

- RAO *tension* maksimum *mooring line 1* sistem tambat *taut* sebesar 282,87 ton/m pada frekuensi 0,35 rad/s; sistem tambat *catenary 1* sebesar 311,55 ton/m pada frekuensi 0,33 rad/s dan

sistem tambat *catenary* 2 sebesar 332,43 ton/ pada frekuensi 0,31 rad/s.

- RAO *tension* maksimum *mooring line* 3 sistem tambat *taut* sebesar 280,17 ton/m pada frekuensi 0,35 rad/s; sistem tambat *catenary* 1 sebesar 308.53 ton/m pada frekuensi 0,33 rad/s dan sistem tambat *catenary* 2 sebesar 329,48 ton/ pada frekuensi 0,31 rad/s.
- RAO *tension* maksimum *mooring line* 4 sistem tambat *taut* sebesar 282,87 ton/m pada frekuensi 0,35 rad/s; sistem tambat *catenary* 1 sebesar 311.55 ton/m pada frekuensi 0,33 rad/s dan sistem tambat *catenary* 2 sebesar 332,43 ton/ pada frekuensi 0,31 rad/s.

7. Pengaruh dari sistem tambat yang digunakan pada model SPAR adalah signifikan baik untuk respon gerak maupun *tension* tali tambat.
8. Semakin panjang tali yang digunakan pada sistem tambat, maka respon gerak yang terjadi semakin besar dan *tension line force* yang terjadi juga semakin besar.

5.2. SARAN

Berikut merupakan saran-saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya.

- 1) Perlu dilakukan decay test terlebih dahulu pada model SPAR sebelum uji eksperimen dilakukan untuk mengetahui besarnya redaman pada model SPAR.
- 2) Menggunakan wave probe agar dapat mengetahui dengan jelas interaksi antara gaya gelombang yang bekerja dengan respon struktur yang terjadi.
- 3) Melakukan analisa secara analitis untuk *tension* tali tambat yang terjadi.

- 4) Selalu berkomunikasi dengan baik kepada bapak bapak teknisi laboratorium Hidrodinamika ITS karena jadwal uji eksperimen beliau yang menentukan.
- 5) Dapat dilakukan percobaan dengan memberikan tambahan *helical strike* dan juga *dumping plate* pada model SPAR.
- 6) Instrumen yang digunakan kedepannya lebih canggih dan yang asli agar tidak mudah rusak.
- 7) Studi komparasi terhadap gerakan jenis SPAR lainnya.

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

DAFTAR PUSTAKA

- abc-moorings. (2010). Retrieved February 21, 2017, from abc-moorings.weebly.com: <http://abc-moorings.weebly.com/mooring-systems.html>
- Agarwal, A., & Jain, A. (2003). Dynamic behavior of offshore spar platforms under regular sea waves. *Ocean Engineering*, 487-516.
- Bhattacharyya, R. (1978). *Dynamic of Marine Vehicles*. USA: John Wiley & Sons.
- Chakrabarti, S. (1994). *Offshore Structure Modeling*. Plainfield: World Scientific.
- Chakrabarti, S. (2005). *Handbook of Offshore Engineering*. Plainfield: Elsevier.
- Chen, X. (2011). Offshore hydrodynamics and applications. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering Vol 4, No. 3*, 124-142.
- Chen, X. H., & Zhang, J. (1999). Coupled Time-Domain Analysis of the Response of a Spar and Its Mooring System. *Proceedings of the Ninth (1999) International Offshore and Polar Engineering Conference* (pp. 293-300). Brest, France: The International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Deep Oil Technology Inc. (1995). *Spar Model Test Joint Industry Project*. California: Deep Oil Technology Inc.
- Djarmiko, E. B. (1992). *Hydro-structural studies on swath type vessel*. Glasgow: Glasgow Theses Service.
- Djarmiko, E. B. (2012). *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya: ITSpress.
- Engineering, O. C. (2006). Retrieved February 21, 2017, from dredgingengineering.com: <http://www.dredgingengineering.com/moorings/lines/Offshore%20mooring%20lines%20mooring%20system.htm>
- Faltinsen, O. M. (1990). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge: University of Cambridge .
- Gianville, R. S., Deep Oil Technology Inc, Pauling, J. R., & Halkyard, J. E. (1991). Analysis of the Spar Floating Drilling Production and Storage

- Structure. *OTC 6701* (pp. 57-68). Houston, Texas: Offshore Technology Conference.
- Jaelani, A. (2008). *Kajian Eksperimental Perbandingan Pengaruh Sistem Tambat Taut dan Catenary Terhadap Gerakan Spar Tipe Klasik Akibat Beban Gelombang*. Surabaya: ITS.
- Journee, J., & Massie, W. (2001). *Offshore Hydromechanics* (1st ed.). Delft : TU Delft.
- Jun, B. R., & Hang, S. C. (2002). Heave and Pitch Motions of a Spar Platform with Damping Plate. *Proceedings of the Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference* (pp. 198-201). Kitakyushu, Japan: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE).
- Jun, B. R., & Hang, S. C. (2003). An Experimental Study For Mooring Effects on the Stability of SPAR Platform. *Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference* (pp. 285-288). Honolulu, Hawaii, USA: The International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE).
- Li, C. (2012). *Coupled Analysis of the Motion and Mooring Loads of a SPAR 'Constitution'*. Texas A&M University.
- Lim, S. J., Rho, J. B., & Choi, H. S. (2005). An Experimental Study on Motion Characteristics of Cell Spar Platform. *Proceedings of the fifteenth (2005) International Offshore and Polar Engineering Conference* (pp. 233-237). Seoul: The International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Liu, T., Chen, X., Wu, J.-F., & Huang, K. (2003). Global Performance and Mooring Analysis of Truss Spar. *Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineers Conference* (pp. 256-263). Honolulu, Hawaii, USA: International Society of Offshore and Polar Engineers.
- M. K. Al-Solihat and M. Nahon, "Stiffness of slack and taut moorings," *Ships and Offshore Structures*, vol. 11, no. 8, pp. 890-904, 2015
- Mansouri, R., & Hadidi, H. (2009). Comprehensive Study on the Linear Hydrodynamic Analysis of a Truss Spar in Random Waves. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*.

- Marine, B. (2004). *Marine Equipment Handbook*. United Kingdom: Balmoral Group Ltd.
- Montasir, O. A., Anurag, Y., & Kurian, V. J. (2016). Effect of Mooring Line Pretensions on the Dynamic Response of Truss Spar Platforms. *Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. 1061-1066). Rhodes, Greece: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE).
- offshore-mag. (2016). Retrieved February 22, 2017, from www.offshore-mag.com: <http://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-65/issue-6/gulf-of-mexico/polyester-mooring-system-makes-debut-with-truss-spar.html>
- R. K. Jain, "A simple method of calculating the equivalent," *Applied Ocean Research*, Vol. 2, No. 3, p. Technical Notes, 1980.
- Ran, Z., Kim, M. H., Niedzwecki, J., & Johnson, R. P. (1995). Response of a Spar Platform in Random Waves and Currents. *Proceedings of the Fifth (1995) International Offshore and Polar Engineering Conference* (pp. 363-371). The Hague, Netherland: The International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Sarpkaya, T. ". (2010). *Wave Forces on Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Seebai, T., & Sundaravadivelu, R. (2009). Effect of Taut and Catenary Mooring on Spar Platform with 5MW Wind Turbine. *Proceedings of The Eighth (2009) ISOPE Ocean Mining Symposium* (pp. 52-58). Chennai, India: The International Society of Offshore .
- Sinpyo, H., Inwon, L., Seong, H. P., Cheolmin, L., & Ho-Hwan, C. (2013). Scale Model Experiments of the SPAR-Type Floating Offshore Platform. *Proceeding of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering* (pp. 907-912). Alaska, USA: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE).
- Sinpyo, H., Inwon, L., Song, H. P., & Cheolmin, L. (2015). An Experimental Study of The Effect of Mooring Systems on The Dynamics of a SPAR Bouy-type Floating Offshore Wind Turbine. *International Journal Naval Architecture Ocean Engineering*, 559-579.
- Sudhakar, S., & Nallayarasu, S. (2011). Influence of Heave Plate On Hydrodynamic Response of SPAR. *30th International Confrence on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2011*. Rotterdam: ASME.

- Tang, Y.-g., Zhang, S.-x., Zhang, R.-y., & Liu, H.-x. (2007). Development of study on the dynamic characteristic of deep water mooring system. *Journal of Marine Science and Application*, 17-23.
- Technip. (2017). Retrieved February 20, 2017, from technip.com:
<http://www.technip.com/en/our-business/offshore/floating-platforms#>
- Wang, Z. (2012). *An Evolutionary Optimisation Study on Offshore Mooring System Design*. New south wales: University of Wollongong.
- Xiaorong, Y., Gao, Z., Moan, T., & Zhang, L. (2014). Comparison of Numerical and Experimental Analyses of Motion Response of a Spar-Type Floating Offshore Wind Turbine in Waves. *Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. 390-397). Busan, Korea: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE).

**LAMPIRAN TABULASI DISTRIBUSI MASSA
(TITIK BERAT DAN GIRASI)**

Data Spar

ID	12.80000256	cm
OD	14.00000256	cm
Draft	108.0076406	cm
Length	123.3676437	cm
Fairlead Depth	10.19124013	cm
Length	40	cm
Width	40	cm
Height	15.65257456	cm
Depth A	731.4287177	cm
Depth B	182.8571794	cm
KG	49.61768611	cm
Pitch Radius	49.17639079	cm
Roll Radius	49.17639079	cm

Data Lab

$\gamma =$	1	g/cm^3

Displasemen teori

$\Delta = \gamma \nabla$		
$\Delta =$	13898.38934	g

Model

Pre-initial design

	Bagian	Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	2	1628.489876	1	1628.489876
	Ballast 2	2	1623.089876	1	1623.089876
	Ballast 3	2.5	2094.089876	1	2094.089876
	Ballast 4	1	663.5898755	1	663.5898755
	Cap	0.3	47.46	1	47.46
Blok B	Ballast 1	2.5	2096.689876	1	2096.689876
	Ballast 2	0.8	465.9898755	1	465.9898755
	Ballast 3	0.5	179.4898755	1	179.4898755
Topside		0.3	599.5	1	599.5
Tambahan	Ulir (130 cm)		352.0898755	1	352.0898755
	Pipa	-	4087.53	1	4087.529853
	Penyambung	-		1	0
	Mur	-		2	0
Total					13838.0131

1. Blok A

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
<i>Ballast 1</i>	2	6.8	1628.489876	11073.73115
<i>Ballast 2</i>	2	4.8	1623.089876	7790.831403
<i>Ballast 4</i>	1	3.3	2094.089876	6910.496589
<i>Ballast 3</i>	2.5	1.6	663.5898755	1028.564307
<i>Cap</i>	0.3	0.2	47.46423964	7.119635947
Total			6056.723742	26810.74309

Pengecekan

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \frac{\text{Model-Teori}}{\text{Teori}} \times 100\% \\ &= -0.4\% \quad \text{memenuhi} \end{aligned}$$

2. Blok B

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
<i>Ballast 7</i>	0.5	112.1	179.4898755	20111.84055
<i>Ballast 6</i>	0.8	111.4	465.9898755	51911.27213
<i>Ballast 5</i>	2.5	109.8	2096.689876	230111.7138
Total			2742.169627	302134.8265

$$\text{VCG Blok B} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 110.1809398 \text{ cm dari keel}$$

3. Tambahan

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
Ulir (130 cm)	-	65.3	352.0898755	22991.46887
Pipa	-	61.7	4087.53	252200.5919
<i>Topside</i>	0.3	123.55	599.5	74068.225
Total			5039.119729	349260.2858

$$\text{VCG tambahan} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 69.3097812 \text{ cm dari keel}$$

4. Total

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa	Momen
Blok A	-	4.4	6056.723742	26810.74309
Blok B	-	110.2	2742.169627	302134.8265
Tambahan	-	69.3	5039.119729	349260.2858
Total			13838.0131	678205.8554

$$\text{VCG total} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 49.01034929 \text{ cm dari keel}$$

Pengecekan

$$\begin{aligned} \text{Error} &= \frac{\text{Model-Teori}}{\text{Teori}} \times 100\% \\ &= -1.2\% \quad \text{memenuhi} \end{aligned}$$

Perhitungan Radius girasi model

1. Blok A								
Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	LCG (cm)	TCG (cm)	Diameter (cm)	Massa (g)	lox (g.cm)	loy (g.cm)
Ballast 1	2	6.5	0	0	12.5	1628.4899	16446.0514	16446.0514
Ballast 2	2	4.5	0	0	12.5	1623.0899	16391.51702	16391.51702
Ballast 3	1	3.0	0	0	12.5	2094.0899	20624.60393	20624.60393
Ballast 4	2.5	1.3	0	0	12.5	663.58988	6825.989605	6825.989605
Cap	0.3	0.2	0	0	12.6	47.46424	471.3198997	471.3198997

2. Blok B								
Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	LCG (cm)	TCG (cm)	Diameter (cm)	Massa (g)	lox (g.cm)	loy (g.cm)
Ballast 7	0.5	112.05	0	0	12.5	179.48988	1756.570188	1756.570188
Ballast 6	0.8	111.4	0	0	12.5	465.98988	4556.895577	4556.895577
Ballast 5	2.5	109.75	0	0	12.5	2096.6899	20748.49356	20748.49356

3. Tambahan								
Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel	LCG (cm)	TCG (cm)	Ukuran (cm)	Massa (g)	lox (g.cm)	loy (g.cm)
Ulir (130 cm)	0.8	65.3	0	0	1	352.08988	495873.9916	495873.9916
Pipa	123.4	61.7	0	0	14	4087.5299	5287070.0	5287069.989
Topside	0.3	123.55	0	0	40	599.5	79937.82958	79937.82958

4. Total														
Bagian	LCG (cm)	TCG (cm)	VCG from keel (cm)	Ditinjau dari COG (cm)	Massa (g)	lox (g.cm)	loy (g.cm)	y^2+z^2	x^2+z^2	$w^*(y^2+z^2)$	$w^*(x^2+z^2)$	lx (g.cm)	ly (g.cm)	
Blok A	Ballast 1	0.00	0.00	6.50	-42.51	1628.49	16446.05	1807.13	1807.13	2942892.58	2942892.58	2959338.63	2959338.63	
	Ballast 2	0.00	0.00	4.50	-44.51	1623.09	16391.52	1807.17	1981.17	3215618.91	3215618.91	3232010.42	3232010.42	
	Ballast 3	0.00	0.00	3.00	-46.01	2094.09	20624.60	2116.95	2116.95	4433088.26	4433088.26	4453712.86	4453712.86	
	Ballast 4	0.00	0.00	1.25	-47.76	663.59	6825.99	2281.05	2281.05	1513682.33	1513682.33	1520508.32	1520508.32	
	Cap	0.00	0.00	0.15	-48.86	47.46	471.32	2387.33	2387.33	113312.98	113312.98	113784.30	113784.30	
Blok B	Ballast 1	0.00	0.00	112.05	63.04	179.49	1756.57	3974.00	3974.00	713292.33	713292.33	715048.90	715048.90	
	Ballast 2	0.00	0.00	111.40	62.39	465.99	4556.90	3892.47	3892.47	1813850.92	1813850.92	1818407.81	1818407.81	
	Ballast 3	0.00	0.00	109.75	60.74	2096.69	20748.49	3689.31	3689.31	7735328.79	7735328.79	7756077.29	7756077.29	
Tambahan	Ulir (130 cm)	0.00	0.00	65.30	16.29	352.09	495873.99	265.35	265.35	93428.01	93428.01	589302.00	589302.00	
	Pipa	0.00	0.00	61.70	12.69	4087.53	5287069.99	161.03	161.03	658203.63	658203.63	5945273.62	5945273.62	
	Topside	0.00	0.00	123.55	74.54	599.50	79937.83	5556.16	5556.16	3330917.64	3330917.64	3410855.47	3410855.47	
Total												32514319.61	32514319.6	

5. Jari Jari Girasi

Rxx= 48.47306334 cm

Ryy= 48.47306334 cm

6. Check

Err Rxx= -1.43%

Err Ryy= -1.43%

memenuhi

memenuhi

LAMPIRAN PENGUKURAN PERIODE GERAK PENDULUM MODEL SPAR

No uji coba	Model tanpa beban tambahan		Model dengan beban tambahan	
	Periode sepuluh getaran (s)	periode satu getaran (s)	Periode sepuluh getaran (s)	periode satu getaran (s)
1	34.918	3.492	35.131	3.513
2	35.063	3.506	35.226	3.523
3	34.958	3.496	35.159	3.516
4	34.727	3.473	35.231	3.523
5	34.973	3.497	35.058	3.506
6	35.037	3.504	35.236	3.524
7	34.882	3.488	35.026	3.503
8	34.800	3.480	35.148	3.515
9	35.160	3.516	35.330	3.533
10	35.220	3.522	35.530	3.553
11	34.746	3.475	35.460	3.546
12	34.858	3.486	35.040	3.504
13	35.150	3.515	36.110	3.611
14	34.896	3.490	35.117	3.512
15	35.510	3.551	35.200	3.520
16	35.000	3.500	36.030	3.603
17	34.880	3.488	35.120	3.512
18	35.060	3.506	36.020	3.602
19	35.180	3.518	35.970	3.597
20	34.850	3.485	35.132	3.513
21	34.910	3.491	35.760	3.576
22	35.240	3.524	35.920	3.592
23	35.310	3.531	35.570	3.557
24	35.030	3.503	35.183	3.518
25	35.140	3.514	35.390	3.539
26	34.900	3.490	35.790	3.579
27	35.271	3.527	35.370	3.537
28	34.970	3.497	36.080	3.608
29	35.130	3.513	35.105	3.511
30	35.038	3.504	35.191	3.519
31	35.220	3.522	35.084	3.508
32	34.910	3.491	35.135	3.514
33	34.852	3.485	35.650	3.565
34	34.678	3.468	36.120	3.612
35	34.960	3.496	34.960	3.496
36	35.110	3.511	35.450	3.545
37	35.070	3.507	36.050	3.605
38	35.210	3.521	35.820	3.582
39	35.102	3.510	35.660	3.566
40	34.940	3.494	35.790	3.579
41	34.810	3.481	35.150	3.515
42	35.012	3.501	35.380	3.538
43	35.111	3.511	35.250	3.525
44	34.938	3.494	35.143	3.514
45	34.900	3.490	35.117	3.512
46	34.985	3.499	35.252	3.525
47	35.109	3.511	35.252	3.525
48	35.131	3.513	35.049	3.505
49	34.995	3.500	35.038	3.504
50	35.158	3.516	35.025	3.503

LAMPIRAN PERHITUNGAN ANALITIS GERAKAN SPAR KONDISI FREE FLOATING

ANALITIS SURGE FREE FLOATING

HULL CHARACTERISTICS		
	Full Scale	Satuan
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Length	154.23	m
Fairlead Depth	12.74	m

Density	1025.00	Kg/m ³
Massa	27834342.56	kg
Added Mass	27834342.56	Kg/m
Massa total	55668685.11	kg
WPA	201.11	M2
Surge Stiffness	0	0
Natural Freq	0	0

T	ω (rad/s)	k	Fa	RAO
40	0.16	0.002515	1164633	0.848
35	0.18	0.003285	1448995	0.808
30	0.21	0.004471	1833155	0.751
25.00	0.25	0.006439	2349047	0.668
20.00	0.31	0.010061	3004819	0.547
19.00	0.33	0.011148	3146730	0.517
18.00	0.35	0.012421	3288510	0.485
17.00	0.37	0.013925	3427465	0.451
16.00	0.39	0.01572	3560267	0.415
15.00	0.42	0.017886	3683043	0.377
14.50	0.43	0.019141	3739372	0.358
14.00	0.45	0.020532	3791636	0.338
13.50	0.47	0.022081	3839355	0.318
13.00	0.48	0.023812	3882110	0.299
12.50	0.50	0.025756	3919578	0.279
12.00	0.52	0.027947	3951561	0.259
11.00	0.57	0.033259	3999122	0.220
10.50	0.60	0.036502	4015201	0.201
10.00	0.63	0.040243	4026808	0.183
9.50	0.66	0.044591	4034649	0.166

T	ω (rad/s)	k	Fa	RAO
9.00	0.70	0.049683	4039531	0.149
8.50	0.74	0.0557	4042276	0.133
8.00	0.79	0.06288	4043636	0.118
7.50	0.84	0.071543	4044209	0.104
7.00	0.90	0.082129	4044405	0.090
6.50	0.97	0.09525	4044456	0.078
6.00	1.05	0.111786	4044466	0.066
5.50	1.14	0.133035	4044467	0.056
5.00	1.26	0.160972	4044467	0.046
4.50	1.40	0.198731	4044467	0.037
4.00	1.57	0.251519	4044467	0.029
3.00	2.09	0.447145	4044467	0.017

ANALISIS HEAVE TERTAMBAT

HULL CHARACTERISTICS		
	Full Scale	Model
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Length	154.23	m
Fairlead Depth	12.74	m

Density	1025.00	Kg/m ³
Massa	27834342.56	kg
Added Mass	699995.77	kg
Massa total	28534338.32	kg
WPA	201.11	M2
Heave Stiffness	2022233.434	N/m
Natural Freq	0.26621452	Rad/s

T	ω (rad/s)	k	A	B	Fa	RAO
40	0.16	0.00251519	0.71204	2004961.7	1427619	1.083
35	0.18	0.003285146	0.64173	1999674.5	1283259	1.164
30	0.21	0.004471448	0.54675	1991528.2	1088868	1.413
25.00	0.25	0.006438886	0.41919	1978017.9	829174.8	3.772
20.00	0.31	0.010060759	0.25705	1953146.6	502064.7	0.632
19.00	0.33	0.011147655	0.22197	1945682.9	431876.9	0.393
18.00	0.35	0.01242069	0.18691	1936941.1	362036.2	0.249
17.00	0.37	0.013924926	0.15255	1926611.5	293913.5	0.157
16.00	0.39	0.015719936	0.11972	1914285.3	229176.7	0.096

T	ω (rad/s)	k	A	B	Fa	RAO
15.00	0.42	0.017885793	0.08936	1899412.4	169736.2	0.057
14.50	0.43	0.019140564	0.07544	1890796	142632.6	0.043
14.00	0.45	0.020532161	0.06251	1881239.9	117601.6	0.032
13.50	0.47	0.022081226	0.05071	1870602.6	94866.19	0.023
13.00	0.48	0.023812447	0.04014	1858714.3	74614.24	0.016
12.50	0.50	0.025755543	0.03088	1845371.2	56983.26	0.011
12.00	0.52	0.027946552	0.02297	1830325.6	42044.43	0.007
11.00	0.57	0.033258707	0.01121	1793847.3	20111.96	0.003
10.50	0.60	0.036501619	0.00724	1771578.3	12819.2	0.002
10.00	0.63	0.040243035	0.00437	1745886.2	7622.812	0.001
9.50	0.66	0.044590621	0.00243	1716031.5	4165.593	0.000
9.00	0.70	0.04968276	0.00122	1681064	2051.76	0.000
8.50	0.74	0.055699703	0.00054	1639745.9	888.133	0.000
8.00	0.79	0.062879743	0.00021	1590440.9	326.7177	0.000
7.50	0.84	0.071543174	0.00006	1530949.4	97.62967	0.000
7.00	0.90	0.082128643	0.00002	1458259.5	22.26952	0.000
6.50	0.97	0.095249788	0.00000	1368157.1	3.552812	0.000
6.00	1.05	0.111786209	0.00000	1254602.2	0.349322	0.000
5.50	1.14	0.133034827	0.00000	1108688.8	0.017518	0.000
5.00	1.26	0.160972141	0.00000	916844.43	0.000333	0.000
4.50	1.40	0.198731038	0.00000	657555.65	1.46E-06	0.000
4.00	1.57	0.25151897	0.00000	295063.11	5.25E-10	0.000
3.00	2.09	0.447144836	0.00000	1048291.6	6.3E-21	0.000

ANALITIS PITCH FREE FLOATING

HULL CHARACTERISTICS		
	Full Scale	Satuan
Diameter	16.00	m
Draft	135.03	m
Length	154.23	m
Fairlead Depth	12.74	m

Density	1025.00	Kg/m ³
massa	27828127.19	kg
Momen inersia massa	105178192100.4950	Kg m ²
Momen inersia massa tambah	63106915260	Kg m ²
momen inelrsia total	168285107360.79	Kg m ²
Pitch Stiffness	1529619959	N m
Natural Freq	0.095338635	Rad/s

T	ω (rad/s)	k	Fa	Ma	RAO analitis	RAO analitis(Θ/m)
40	0.16	0.00251519	- 4043456	10823807	0.0041	0.2365
35	0.18	0.003285146	- 4043456	15148371	0.0039	0.2229
30	0.21	0.004471448	- 4043456	22422849	0.0038	0.2195
25.00	0.25	0.006438886	- 4043456	35565381	0.0039	0.2239
20.00	0.31	0.010060759	- 4043456	61036444	0.0040	0.2319
19.00	0.33	0.011147655	- 4043456	68621963	0.0041	0.2330
18.00	0.35	0.01242069	- 4043456	77341900	0.0041	0.2335
17.00	0.37	0.013924926	- 4043456	87342108	0.0041	0.2332
16.00	0.39	0.015719936	- 4043456	98759629	0.0040	0.2317
15.00	0.42	0.017885793	- 4043456	1.12E+08	0.0040	0.2286
14.50	0.43	0.019140564	- 4043456	1.19E+08	0.0039	0.2263
14.00	0.45	0.020532161	- 4043456	1.26E+08	0.0039	0.2234
13.50	0.47	0.022081226	- 4043456	1.34E+08	0.0038	0.2199
13.00	0.48	0.023812447	- 4043456	1.42E+08	0.0038	0.2157
12.50	0.50	0.025755543	- 4043456	1.51E+08	0.0037	0.2107

12.00	0.52	0.027946552	- 4043456	1.6E+08	0.0036	0.2049
11.00	0.57	0.033258707	- 4043456	1.78E+08	0.0033	0.1908
10.50	0.60	0.036501619	- 4043456	1.87E+08	0.0032	0.1824
10.00	0.63	0.040243035	- 4043456	1.96E+08	0.0030	0.1732
9.50	0.66	0.044590621	- 4043456	2.05E+08	0.0028	0.1632
9.00	0.70	0.04968276	- 4043456	2.14E+08	0.0027	0.1525
8.50	0.74	0.055699703	- 4043456	2.23E+08	0.0025	0.1411
8.00	0.79	0.062879743	- 4043456	2.31E+08	0.0023	0.1294
7.50	0.84	0.071543174	- 4043456	2.39E+08	0.0020	0.1173
7.00	0.90	0.082128643	- 4043456	2.46E+08	0.0018	0.1051
6.50	0.97	0.095249788	- 4043456	2.53E+08	0.0016	0.0930
6.00	1.05	0.111786209	- 4043456	2.59E+08	0.0014	0.0811
5.50	1.14	0.133034827	- 4043456	2.65E+08	0.0012	0.0696
5.00	1.26	0.160972141	- 4043456	2.7E+08	0.0010	0.0586
4.50	1.40	0.198731038	- 4043456	2.75E+08	0.0008	0.0482
4.00	1.57	0.25151897	- 4043456	2.79E+08	0.0007	0.0387
3.00	2.09	0.447144836	- 4043456	2.86E+08	0.0004	0.0223

LAMPIRAN PERHITUNGAN ANALITIS GERAKAN SPAR KONDISI TERTAMBAT

ANALITIS SURGE TERTAMBAT

$$C_{11} = \sum_{i=1}^N k_i \cos^2 \varphi_i$$

Data Mooring

Lo	225	m
EA	1175000000	N
EA/Lo (ki)	5548996.458	N/m

Sudut Sebar-Line

β_1	45.000	deg
β_2	135.000	deg
β_3	225.000	deg
β_4	315.000	deg

	Full Scale	
Line 1	2774498	N/m
Line 2	2774498	N/m
Line 3	2774498	N/m
Line 4	2774498	N/m
K11	11097993	N/m

Perhitungan Surge Tertambat

m	27834342.56	kg	(massa)
ma	27834342.56	kg	(massa tambah)
kh	0.00	N/m	(kekakuan hidrostatik)
km	11097992.92	N/m	(kekakuan mooring)
K	11097992.92	N/m	(kekakuan total)
b	0.00	Ns/m	(damping)

T	ω	Fa	RAO (m/m)
(s)	(rad/s)	(N)	Analitis
40.000	0.157	1164632.646	0.120
35.000	0.180	1448994.995	0.156
30.000	0.209	1833154.510	0.212
25.000	0.251	2349047.384	0.310
20.000	0.314	3004819.384	0.536
19.000	0.331	3146729.761	0.628
18.000	0.349	3288510.259	0.762
17.000	0.370	3427464.764	0.981
16.000	0.393	3560266.549	1.417
15.000	0.419	3683043.252	2.768
14.500	0.433	3739371.745	5.796
14.000	0.460	3791635.873	5.564
13.500	0.465	3839354.800	3.996
13.000	0.483	3882110.123	2.037
12.500	0.503	3919577.682	1.321
12.000	0.524	3951561.383	0.949
11.000	0.571	3999121.792	0.566
10.500	0.598	4015200.974	0.454
10.000	0.628	4026808.092	0.370
9.500	0.661	4034649.097	0.304
9.000	0.698	4039530.543	0.252
8.500	0.739	4042276.269	0.209
8.000	0.785	4043636.029	0.174
7.500	0.838	4044208.949	0.145
7.000	0.898	4044405.103	0.120
6.500	0.967	4044456.364	0.099
6.000	1.047	4044465.741	0.081
5.500	1.142	4044466.803	0.066
5.000	1.257	4044466.866	0.053
4.500	1.396	4044466.867	0.042
4.000	1.571	4044466.867	0.032
3.000	2.094	4044466.867	0.017

ANALITIS HEAVE TERTAMBAT

Data Mooring

Lo	225	m
EA	1175000000	N
EA/Lo	5548996.458	N/m
T	904874.400	N
L	211.173	m

Sudut Tanah-Line

α_1	60.000	deg
α_2	60.000	deg
α_3	60.000	deg
α_4	60.000	deg

Sudut Sebar-Line

β_1	45.000	deg
β_2	135.000	deg
β_3	225.000	deg
β_4	315.000	deg

	kp11 (N/m)	kp22 (N/m)	kp12 (N/m)
LineA	1390451.634	4162814.85	2400936.973
LineB	1390451.634	4162814.85	2400936.973
LineC	1390451.634	4162814.85	2400936.973
LineD	1390451.634	4162814.85	2400936.973

	k33	
LineA	4162815	N/m
LineB	4162815	N/m
LineC	4162815	N/m
LineD	4162815	N/m
K33 (TOTAL)	16651259	N/m

Perhitungan Heave Tertambat

m	27834342.56	kg	(massa)
ma	27834342.56	kg	(massa tambah)
kh	2022233.434	N/m	(kekakuan hidrostatik)
km	16651259.40	N/m	(kekakuan mooring)
K	18673492.83	N/m	(kekakuan total)
b	0.00	Ns/m	(damping)

T	ω	Fa	RAO (m/m)
(s)	(rad/s)	(N)	Analitis
40.000	0.157	1427619	0.079
35.000	0.180	1283259	0.072
30.000	0.209	1088868	0.063
25.000	0.251	829174.8	0.049
20.000	0.314	502064.7	0.032
19.000	0.331	431876.9	0.028
18.000	0.349	362036.2	0.024
17.000	0.370	293913.5	0.020
16.000	0.393	229176.7	0.016
15.000	0.419	169736.2	0.012
14.500	0.433	142632.6	0.011
14.000	0.449	117601.6	0.009
13.500	0.465	94866.19	0.008
13.000	0.483	74614.24	0.006
12.500	0.503	56983.26	0.005
12.000	0.524	42044.43	0.004
11.000	0.571	20111.96	0.002
10.500	0.598	12819.2	0.002
10.000	0.628	7622.812	0.001
9.500	0.661	4165.593	0.001
9.000	0.698	2051.76	0.000
8.500	0.739	888.133	0.000
8.000	0.785	326.7177	0.000
7.500	0.838	97.62967	0.000
7.000	0.898	22.26952	0.000
6.500	0.967	3.552812	0.000
6.000	1.047	0.349322	0.000
5.500	1.142	0.017518	0.000
5.000	1.257	0.000333	0.000
4.500	1.396	1.46E-06	0.000
4.000	1.571	5.25E-10	0.000
3.000	2.094	6.3E-21	0.000

ANALISIS PITCH TERTAMBAT

Rho	55
w	539.55
Y	200
Tb	904874.4
L	211.75
Theta	60
	1.047197551
To	452437.2
I	1452.403332
xb	1104.329058
yb	838.5454545
ya	1038.545455
L'	1679.378397
L	226.9750657
xa	1211.576404
X	107.2473455
Ta	1012784.4
A	450.8857644
B	5.30912E-05
M	0.000183952
R	44.67260752

K55

Line 1	5765049068.151	N
Line 2	5765049068.151	N
Line 3	5765049068.151	N
Line 4	5765049068.151	N
K11 Total	23060196272.604	N

Perhitungan Pitch Tertambat

I	105201683462.20	kg m ²
Ia	63121010077.32	kg m ²
kh	1529619959.06	N/m
km	23060196272.60	N/m
K	24589816231.67	N/m
b	0.00	N s/m

T	ω	Ma	RAO (deg/m)
(s)	(rad/s)	(N m)	Analitis
40.000	0.157	10828130.788	0.030
35.000	0.180	15154062.849	0.045
30.000	0.209	22430662.855	0.075
25.000	0.251	35576710.654	0.146
20.000	0.314	61054039.927	0.439
19.000	0.331	68641354.617	0.636
18.000	0.349	77363333.066	1.086
17.000	0.370	87365863.851	3.136
16.000	0.393	98786020.651	4.138
15.000	0.419	111731150.755	1.295
14.500	0.433	118793419.567	0.970
14.000	0.449	126247068.051	0.777
13.500	0.465	134081042.158	0.647
13.000	0.483	142274490.027	0.553
12.500	0.503	150795141.063	0.482
12.000	0.524	159597951.285	0.424
11.000	0.571	177802031.225	0.336
10.500	0.598	187046868.816	0.300
10.000	0.628	196265271.147	0.269
9.500	0.661	205359118.525	0.240
9.000	0.698	214231850.468	0.214
8.500	0.739	222795346.322	0.189
8.000	0.785	230976220.754	0.167
7.500	0.838	238719905.110	0.146
7.000	0.898	245991210.017	0.127
6.500	0.967	252771208.633	0.109
6.000	1.047	259051841.772	0.093
5.500	1.142	264830576.046	0.078
5.000	1.257	270106876.262	0.064
4.500	1.396	274880675.525	0.052
4.000	1.571	279151969.692	0.041
3.000	2.094	286187042.439	0.023

LAMPIRAN DATA INPUT MOSES EKSTENSI FILE .DAT (FREE FLOATING)

&dimen -save -dimen meters m-tons
&describe body spar
pgen A -loc 0 0 0 0 -90 0 -difftype 3ddiff -tanaka 1
plane 0 154.23 -circular 0 0 8 0 22.5 9
end pgen

LAMPIRAN DATA INPUT MOSES EKSTENSI FILE .CIF (FREE FLOATING)

&dimen -remember -dimen meters m-tons
&device -oecho no
&title SPAR (3DDiff By MOSES)
&default -depth 500 -spgwater 1.025
inmodel
&instate -condition spar 135.0264 0 0
 &picture iso
 &picture top
 &picture side
 &picture bow
&weight -compute 62.029848 61.47816 61.47816 61.47816
&equi
&status
Hydrodynamics
&PARA -M_DIST 3.5
&picture iso -type mesh -detail
G_pressure spar pkt1 -heading 0 \
 -period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 15 14.5 14\
 13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9\
 8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 4.5 4 3

HYDR_SUM

```

end_Hydrodynamics
Freq_response
rao -speed 0 -iter 500
fp_std &body(cg spar)
EQU_SUM
  matrices -file
  end
  exforce -file
  end
end_freq_response
&finish

```

LAMPIRAN DATA INPUT MOSES EKSTENSI FILE .CIF (TERTAMBAT TAUT)

```

&dimen -remember -dimen meters m-tons
&device -oecho no
&title SPAR CATENARY MOORING 1 (3DDiff By MOSES)
&default -depth 226.8 -spgwater 1.025

inmodel
  &instate -condition spar 135.0264 0 0
    &picture iso
    &picture top
    &picture side
    &picture bow

  &weight -compute SPAR 62.029848      61.47816      61.47816 30
  &equi
  &status

```

medit

*A 5.6567 5.6567 122.29

*B 5.6567 -5.6567 122.29

*C -5.6567 5.6567 122.29

*D -5.6567 -5.6567 122.29

~wire b_cat 115 -depanchor 226.8 -refine 30 -len 231.25 -b_tension 1199.18 -
wtplen 0.065 -buoydia 0 -EMODULUS 25492905.3244

Connector A -anc 45 126 ~wire *A

Connector B -anc -45 126 ~wire *B

Connector C -anc 135 126 ~wire *C

Connector D -anc -135 126 ~wire *D

end

&picture iso

&connector @ -l_tension 92.24

\$&picture iso

\$&finish

CONN_DESIGN

TABLE A B C D

REPORT

VLIST

PLOT 1 8 -rax 6 -NO

END

MOVE spar -line 0 2000 50

REPORT

VLIST

```

PLOT 1 7 -NO

END

END

&DCPTIME Time To End Mooring Design

&weight -compute SPAR 62.029848      61.47816      61.47816 30

&equi

&status

$&finish

Hydrodynamics

&PARA -M_DIST 3.5

&picture iso -type mesh -detail

G_pressure spar pkt1 -heading 0 \

                                -period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 15 14.5 14\

                                13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9\

                                8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 4.5 4 3

HYDR_SUM

end_Hydrodynamics

Freq_response

rao -speed 0 -iter 500

fp_std &body(cg spar)

EQU_SUM

matrices -file

end

exforce -file

end

fr_cforce A

REPORT

vlist

```

```

        plot 1 7 -no
    end
    fr_cforce B
    REPORT
        vlist
        plot 1 7 -no
    end
    fr_cforce C
    REPORT
        vlist
        plot 1 7 -no
    end
    fr_cforce D
    REPORT
        vlist
        plot 1 7 -no
    end
end_freq_response
&finish

```

LAMPIRAN DATA INPUT MOSES EKSTENSI FILE .CIF (TERTAMBAT CATENARY 1)

```

&dimen -remember -dimen meters m-tons
&device -oecho no
&title SPAR CATENARY MOORING 1 (3DDiff By MOSES)
&default -depth 226.8 -spgwater 1.025

inmodel

&instate -condition spar 135.0264 0 0
&weight -compute SPAR 62.029848      61.47816      61.47816 30

```



```

&equi
&status
medit

*A 5.6567 5.6567 122.29
*B 5.6567 -5.6567 122.29
*C -5.6567 5.6567 122.29
*D -5.6567 -5.6567 122.29

~wire b_cat 115 -depanchor 226.8 -refine 30 -len 232.5 -b_tension 1199.18 -wtplen
0.065 -buoydia 0 -EMODULUS 25492905.3244


Connector A -anc 45 126 ~wire *A
Connector B -anc -45 126 ~wire *B
Connector C -anc 135 126 ~wire *C
Connector D -anc -135 126 ~wire *D

end

&picture iso
&connector @ -l_tension 88
$&picture iso
$&finish

CONN_DESIGN
TABLE A B C D
REPORT
VLIST
PLOT 1 8 -rax 6 -NO
END

MOVE spar -line 0 2000 50
REPORT
VLIST
PLOT 1 7 -NO
END

```

```

END
&DCPTIME Time To End Mooring Design
&weight -compute SPAR 62.029848      61.47816      61.47816 30
&equi
&status
$&finish
Hydrodynamics
&PARAM -M_DIST 3.5
&picture iso -type mesh -detail
G_pressure spar pkt1 -heading 0 \
                -period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 15 14.5 14\
                13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9\
                8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 4.5 4 3
HYDR_SUM
end_Hydrodynamics
Freq_response
rao -speed 0 -iter 500
fp_std &body(cg spar)
EQU_SUM
matrices -file
end
exforce -file
end
fr_cforce A
REPORT
    vlist
    plot 1 7 -no
end
fr_cforce B

```

```

REPORT
    vlist
    plot 1 7 -no
end
fr_cforce C
REPORT
    vlist
    plot 1 7 -no
end
fr_cforce D
REPORT
    vlist
    plot 1 7 -no
end
end_freq_response
&finish

```

LAMPIRAN DATA INPUT MOSES EKSTENSI FILE .CIF (TERTAMBAT CATENARY 2)

```

&dimen -remember -dimen meters m-tons
&device -oecho no
&title SPAR CATENARY MOORING 2 (3DDiff By MOSES)
&default -depth 226.8 -spgwater 1.025

inmodel
    &instate -condition spar 135.0264 0 0
    &weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30
    &equi
    &status
    medit

```

```

*A 5.6567 5.6567 122.29
*B 5.6567 -5.6567 122.29
*C -5.6567 5.6567 122.29
*D -5.6567 -5.6567 122.29

~wire b_cat 115 -depanchor 226.8 -refine 30 -len 240 -b_tension 1199.18 -wtplen
0.065 -buoydia 0 -EMODULUS 25492905.3244

```

```

Connector A -anc 45 126 ~wire *A
Connector B -anc -45 126 ~wire *B
Connector C -anc 135 126 ~wire *C
Connector D -anc -135 126 ~wire *D

```

```
end
```

```
&picture iso
```

```
&connector @ -l_tension 84.43
```

```
$&picture iso
```

```
$&finish
```

```
CONN_DESIGN
```

```
TABLE A B C D
```

```
REPORT
```

```
VLIST
```

```
PLOT 1 8 -rax 6 -NO
```

```
END
```

```
MOVE spar -line 0 2000 50
```

```
REPORT
```

```
VLIST
```

```
PLOT 1 7 -NO
```

```
END
```

```
END
```

```
&DCPTIME Time To End Mooring Design
```

```
&weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30
```



```
end
fr_cforce C
REPORT
    vlist
    plot 1 7 -no
end
fr_cforce D
REPORT
    vlist
    plot 1 7 -no
end
end_freq_response
&finish
```

LAMPIRAN PERHITUNGAN NUMERIS GERAKAN SPAR KONDISI FREE FLOATING

NUMERIS FREE FLOATING

WELCOME TO MOSES Version 07.10.01.11

=====

This Program is licensed for the exclusive use of
Institut Teknologi SepuluhSura
Copying of this program or use by anyone other
than an employee of the above firm without
written consent of Bentley Systems is strictly
prohibited.

Default License Suite: MOSES Automatic Elevation

=====

>&dimen -remember -dimen meters m-tons

>&device -oecho no

>&title SPAR (3DDiff By MOSES)

>&default -depth 500 -spgwater 1.0

>inmodel

Time To perform Inmodel : CP= 0.22

>&instate -condition spar 135.0264 0 0

>&picture iso

>&picture top

>&picture side

>&picture bow

>&weight -compute 62.029848 61.47816 61.47816 61.47816

>&equi

+++ CURRENT SYSTEM CONFIGURATION +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified
Location and Net Force at Body Origin

Body	X	Y	Z	RX	RY	RZ
SPAR	0.00	0.00	-135.03	0.00	0.00	0.00
Location	0.00	0.00	-0.00	0	0	0
N Force	0.00	0.00	-0.00	0	0	0

Equilibrium Converged in 1 Iterations

>&status

+++ BUOYANCY AND WEIGHT FOR SPAR +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified
Results Are Reported In Body System

Draft = 135.03 Roll Angle = 0.00 Pitch Angle = 0.00

Wet Radii Of Gyration About CG

K-X = 61.48 K-Y = 61.48 K-Z = 61.48

GMT = 5.60 GML = 5.60

```

/-- Center of Gravity ---/ Sounding % Full
Name  Weight  ---X--- ---Y--- ---Z--- -----
----- Part SPAR -----
LOAD_GRO 27148.66  0.00  0.00  62.03
=====
Total 27148.66  0.00  0.00  62.03
Buoyancy 27148.66 -0.00  0.00  67.51
>Hydrodynamics
>&PARA -M_DIST 3.5
>&picture iso -type mesh -detail
>G_pressure spar pkt1 -heading 0 22.5 45 -period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 \
15 14.5 14 13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9 8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 \
4.5 4 3

```

Setting Pressure Name for SPAR to PKT1

Mesh Refined: Number of Basic Panels 17 - Panels Used 640

Time to Generate 640 Panels For S	: CP=	0.05
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 1	: CP=	0.69
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 2	: CP=	0.53
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 3	: CP=	0.49
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 4	: CP=	0.51
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 5	: CP=	0.77
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 6	: CP=	0.70
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 7	: CP=	0.61
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 8	: CP=	0.43
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 9	: CP=	0.54
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 10	: CP=	0.40
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 11	: CP=	0.42
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 12	: CP=	0.48
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 13	: CP=	0.38
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 14	: CP=	0.38
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 15	: CP=	0.50
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 16	: CP=	0.49
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 17	: CP=	0.39
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 18	: CP=	0.37
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 19	: CP=	0.38
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 20	: CP=	0.39
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 21	: CP=	0.37
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 22	: CP=	0.36
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 23	: CP=	0.39
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 24	: CP=	0.39
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 25	: CP=	0.37
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 26	: CP=	0.39
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 27	: CP=	0.36

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 28 : CP= 0.40
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 29 : CP= 0.37
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 30 : CP= 0.44
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 31 : CP= 0.59
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 32 : CP= 1.35

Setting Drift Name for SPAR to PKT1

*** WARNING: Negative On Diagonal Of Damping

Time To Set Up Convolution For PKT1 : CP= 0.09
Time to Sum Pressures For 640 Panels on SPAR : CP= 0.01

```
>HYDR_SUM
>end_Hydrodynamics
>
>Freq_response
>rao -speed 0 -iter 500
Time To Compute RAOs : CP= 0.04
>fp_std 1.704959E-5 1.724023E-7 62.02985
>EQU_SUM
>matrices -file
>end
>exforce -file
>end
>end_freq_response
>
>&finish
```

MOSES Finished with 1 Warnings

```
CP Time      16.80
Total Units  16.80
```

	*		*** MOSES ***		*
	*		-----	July 17, 2017	*
	*	SPAR (3DDiff By MOSES)			*
	*				*
* Draft	= 135.0 Meters	Trim Angle	= 0.00 Deg.	GMT	= 5.6 Meters *
* Roll Gy. Radius	= 61.5 Meters	Pitch Gy. Radius	= 61.5 Meters	Yaw Gy. Radius	= 61.5 Meters *
* Heading	= 0.00 Deg.	Forward Speed	= 0.00 Knots	Linearization Based on 1/ 20 *	
	*				*

+++ MOTION RESPONSE OPERATORS +++

=====

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = 0.0 Z = 62.0

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

ENCOUNTER		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
-----	Wave Ampl.	Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	0.946	90	0.000	0	1.109	0	0.000	0	0.231	90	0.000	0
0.1795	35.00	0.851	90	0.000	0	1.193	0	0.000	0	0.209	90	0.000	0
0.2094	30.00	0.758	90	0.000	0	1.454	0	0.000	0	0.205	90	0.000	0
0.2513	25.00	0.660	90	0.000	0	4.297	0	0.000	0	0.214	90	0.000	0
0.3142	20.00	0.536	90	0.000	0	0.583	-179	0.000	0	0.231	90	0.000	0
0.3307	19.00	0.506	90	0.000	0	0.365	-179	0.000	0	0.235	90	0.000	0
0.3491	18.00	0.474	90	0.000	0	0.232	-178	0.000	0	0.237	90	0.000	0
0.3696	17.00	0.440	90	0.000	0	0.146	-178	0.000	0	0.239	90	0.000	0
0.3927	16.00	0.404	90	0.000	0	0.089	-178	0.000	0	0.240	90	0.000	0

0.4189	15.00	0.366	90	0.000	0	0.052	-178	0.000	0	0.239	90	0.000	0
0.4333	14.50	0.347	90	0.000	0	0.039	-178	0.000	0	0.238	90	0.000	0
0.4488	14.00	0.328	90	0.000	0	0.029	-178	0.000	0	0.236	90	0.000	0
0.4654	13.50	0.308	90	0.000	0	0.021	-178	0.000	0	0.233	90	0.000	0
0.4833	13.00	0.288	90	0.000	0	0.015	-177	0.000	0	0.230	90	0.000	0
0.5027	12.50	0.269	90	0.000	0	0.010	-177	0.000	0	0.226	90	0.000	0
0.5236	12.00	0.249	90	0.000	0	0.006	-177	0.000	0	0.220	90	0.000	0
0.5712	11.00	0.211	89	0.000	0	0.002	-176	0.000	0	0.207	89	0.000	0
0.5984	10.50	0.193	89	0.000	0	0.001	-175	0.000	0	0.199	89	0.000	0
0.6283	10.00	0.175	88	0.000	0	0.001	-175	0.000	0	0.190	88	0.000	0
0.6614	9.50	0.158	88	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.179	88	0.000	0
0.6981	9.00	0.141	87	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.168	87	0.000	0
0.7392	8.50	0.125	86	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.155	86	0.000	0
0.7854	8.00	0.110	85	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.141	85	0.000	0
0.8378	7.50	0.094	83	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.126	83	0.000	0
0.8976	7.00	0.079	81	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.109	81	0.000	0
0.9666	6.50	0.064	79	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.091	79	0.000	0
1.0472	6.00	0.050	77	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.072	76	0.000	0
1.1424	5.50	0.036	75	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.054	75	0.000	0
1.2566	5.00	0.024	77	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.036	77	0.000	0
1.3963	4.50	0.015	84	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.023	84	0.000	0
1.5708	4.00	0.008	99	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.013	99	0.000	0
2.0944	3.00	0.001	157	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.001	156	0.000	0

LAMPIRAN PERHITUNGAN NUMERIS GERAKAN SPAR KONDISI TERTAMBAT

NUMERIS TERTAMBAT

WELCOME TO MOSES Version 07.10.01.11

=====

This Program is licensed for the exclusive use of
Institut Teknologi SepuluhSura
Copying of this program or use by anyone other
than an employee of the above firm without
written consent of Bentley Systems is strictly
prohibited.

Default License Suite: MOSES Automatic Elevation

=====

>&dimen -remember -dimen meters m-tons
>&device -oecho no
>&title SPAR (3DDiff By MOSES)
>&default -depth 226.8 -spgwater 1.025
>inmodel

Time To perform Inmodel : CP= 0.30

>&instate -condition spar 135.0264 0 0

>&weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30

>&equi

+++ CURRENT SYSTEM CONFIGURATION +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Location and Net Force at Body Origin

Body	X	Y	Z	RX	RY	RZ
SPAR Location	0.00	0.00	-135.03	0.00	0.00	0.00
N Force	-0.00	0.00	-0.00	0	0	0

Equilibrium Converged in 1 Iterations

>&status

+++ BUOYANCY AND WEIGHT FOR SPAR +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Results Are Reported In Body System

Draft = 135.03 Roll Angle = 0.00 Pitch Angle = 0.00

Wet Radii Of Gyration About CG

K-X = 61.48 K-Y = 61.48 K-Z = 30.00

GMT = 5.60 GML = 5.60

/-- Center of Gravity ---/ Sounding % Full

Name	Weight	--X--	--Y--	--Z--	-----
----- Part SPAR -----					
LOAD_GRO	27117.65	0.00	0.00	62.03	
=====					
Total	27117.65	0.00	0.00	62.03	
Buoyancy	27117.65	-0.00	0.00	67.51	

----- Part SPAR -----

LOAD_GRO 27117.65 0.00 0.00 62.03

=====

Total 27117.65 0.00 0.00 62.03

Buoyancy 27117.65 -0.00 0.00 67.51

```

>
>medit
>*A 5.6567 5.6567 122.29
>*B 5.6567 -5.6567 122.29
>*C -5.6567 5.6567 122.29
>*D -5.6567 -5.6567 122.29
>~wire b_cat 115 -depanchor 226.8 -refine 30 -len 225 -b_tension 1199.18 \
-wtplen 0.065 -buoydia 0 -EMODULUS 25492905.3244

```

```

>
>Connector IV -anc 45 126 ~wire *A
>Connector I -anc -45 126 ~wire *B
>Connector III -anc 135 126 ~wire *C
>Connector II -anc -135 126 ~wire *D
>end

```

```

>&connector @ -l_tension 92.24
Changing Length of Connector I

```

```

=====
Changing Length of Connector II

```

```

=====
Changing Length of Connector III

```

```

=====
Changing Length of Connector IV

```

```

>&picture iso
>&picture top
>CONN_DESIGN
>TABLE I
>REPORT
>VLIST

```

The Variables Available for Selection are:

```

=====
1 Horizontal Distance   5 Max T/Break           9 Hor. Pull On Anchor
2 Horiz. Force At Top  6 Critical Break        10 Line On Bottom
3 DHDX                 7 Critical Segment      11 Height Of 1st Conn.
4 Tension At Top       8 Vert Pull On Anchor   12 Load On 1st Conn.

```

```

>PLOT 1 8 -rax 6 -NO
>END
>MOVE spar -line 0 200 50
>REPORT
>VLIST

```

The Variables Available for Selection are:

```

=====
1 Excursion:SPAR       6 Y Restoring Force     10 Max Ratio
2 Angle                7 Res.Restoring Force  11 Min Tension
3 X Excursion          8 Max Tension           12 Min Horizontal
4 Y Excursion          9 Max Horizontal        13 Min Ratio
5 X Restoring Force

```

```

>PLOT 1 7 -NO
>END

```

```

>END
>&DCPTIME Time To End Mooring Design
Time To End Mooring Design          : CP=  0.25
>&weight -compute SPAR 62.029848 61.47816 61.47816 30
>&equi
+++ CURRENT SYSTEM CONFIGURATION +++
=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified
Location and Net Force at Body Origin

      Body      X      Y      Z      RX      RY      RZ
-----
SPAR  Location  0.00   0.00 -135.03   0.00   0.00   0.00
      N Force  -0.00   0.00  -0.00    0     0     0

Equilibrium Converged in 1 Iterations
>&status
>Hydrodynamics
>&PARA -M_DIST 3.5
>&picture iso -type mesh -detail
>G_pressure spar pkt1 -heading 0 22.5 45 -period 40 35 30 25 20 19 18 17 16 \
15 14.5 14 13.5 13 12.5 12 11 10.5 10 9.5 9 8.5 8 7.5 7 6.5 6 5.5 5 \
4.5 4 3

Setting Pressure Name for SPAR to PKT1
=====
Mesh Refined: Number of Basic Panels 17 - Panels Used 640
Time to Generate 640 Panels For S          : CP=  0.06
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 1      : CP= 11.07
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 2      : CP=  2.28
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 3      : CP=  0.87
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 4      : CP=  0.98
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 5      : CP=  0.61
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 6      : CP=  0.66
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 7      : CP=  4.43
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 8      : CP=  0.80
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 9      : CP=  1.47
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 10     : CP=  1.36
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 11     : CP=  1.23
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 12     : CP=  0.89
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 13     : CP=  0.81
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 14     : CP=  0.98
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 15     : CP=  0.96
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 16     : CP=  0.99
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 17     : CP=  0.59
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 18     : CP=  0.77
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 19     : CP=  0.77
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 20     : CP=  0.61
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 21     : CP=  0.70
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 22     : CP=  0.55

```

Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 23 : CP= 0.57
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 24 : CP= 0.98
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 25 : CP= 0.44
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 26 : CP= 1.13
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 27 : CP= 0.57
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 28 : CP= 0.73
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 29 : CP= 0.45
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 30 : CP= 0.60
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 31 : CP= 0.83
Time For 3D Diff. 640 Panels, Freq. 32 : CP= 1.57

Setting Drift Name for SPAR to PKT1

=====

*** WARNING: Negative On Diagonal Of Damping

=====

Time To Set Up Convolution For PKT1 : CP= 0.08
Time to Sum Pressures For 640 Panels on SPAR : CP= 0.02

>HYDR_SUM

>end_Hydrodynamics

>

>Freq_response

>rao -speed 0 -iter 500

Time To Compute RAOs : CP= 0.05

>fp_std 6.857014E-6 9.848904E-8 62.02985

>EQU_SUM

>matrices -file

>end

>exforce -file

>end

>fr_cforce I

>REPORT

>vlist

The Variables Available for Selection are:

=====

1 Frequency	6 FY-Phase:I	11 MY-Amp:I
2 Period	7 FZ-Amp:I	12 MY-Phase:I
3 FX-Amp:I	8 FZ-Phase:I	13 MZ-Amp:I
4 FX-Phase:I	9 MX-Amp:I	14 MZ-Phase:I
5 FY-Amp:I	10 MX-Phase:I	

>plot 1 7 -no

>end

>fr_cforce II

>REPORT

>vlist

The Variables Available for Selection are:

=====

1 Frequency	6 FY-Phase:II	11 MY-Amp:II
2 Period	7 FZ-Amp:II	12 MY-Phase:II
3 FX-Amp:II	8 FZ-Phase:II	13 MZ-Amp:II
4 FX-Phase:II	9 MX-Amp:II	14 MZ-Phase:II
5 FY-Amp:II	10 MX-Phase:II	

```

>plot 1 7 -no
>end
>fr_cforce III
>REPORT
>vlist

```

The Variables Available for Selection are:

```

=====
1 Frequency      6 FY-Phase:III    11 MY-Amp:III
2 Period        7 FZ-Amp:III    12 MY-Phase:III
3 FX-Amp:III    8 FZ-Phase:III    13 MZ-Amp:III
4 FX-Phase:III  9 MX-Amp:III    14 MZ-Phase:III
5 FY-Amp:III    10 MX-Phase:III

```

```

>plot 1 7 -no
>end
>fr_cforce IV
>REPORT
>vlist

```

The Variables Available for Selection are:

```

=====
1 Frequency      6 FY-Phase:IV    11 MY-Amp:IV
2 Period        7 FZ-Amp:IV    12 MY-Phase:IV
3 FX-Amp:IV     8 FZ-Phase:IV    13 MZ-Amp:IV
4 FX-Phase:IV   9 MX-Amp:IV    14 MZ-Phase:IV
5 FY-Amp:IV     10 MX-Phase:IV

```

```

>plot 1 7 -no
>end
>
>end_freq_response
>
>&finish

```



```

*****
*                                     *** MOSES ***                               *
*                                     ----- July 16, 2017                         *
*      SPAR (3DDiff By MOSES)                                                    *
*                                                                                   *
*   Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg.                        *
* * Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
* * Heading      = 0.00 Deg.   Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization Based on 1/ 20 *
*                                                                                   *
*****

```

+++ MOTION RESPONSE OPERATORS+++

=====

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = 0.0 Z = 62.0

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	0.834	90	0.000	0	0.091	0	0.000	0	1.013	-89	0.000	0
0.1795	35.00	0.609	90	0.000	0	0.085	0	0.000	0	0.902	-89	0.000	0
0.2094	30.00	0.380	90	0.000	0	0.075	0	0.000	0	0.851	-89	0.000	0
0.2513	25.00	0.081	90	0.000	0	0.059	0	0.000	0	0.943	-89	0.000	0

0.3142	20.00	0.739	-90	0.000	0	0.037	0	0.000	0	1.625	-90	0.000	0
0.3307	19.00	1.392	-91	0.000	0	0.032	0	0.000	0	2.415	-91	0.000	0
0.3491	18.00	5.053	-96	0.000	0	0.027	0	0.000	0	7.344	-96	0.000	0
0.3696	17.00	4.176	96	0.000	0	0.022	1	0.000	0	5.310	96	0.000	0
0.3927	16.00	1.584	93	0.000	0	0.018	1	0.000	0	1.828	93	0.000	0
0.4189	15.00	0.957	92	0.000	0	0.013	1	0.000	0	1.044	92	0.000	0
0.4333	14.50	0.804	92	0.000	0	0.011	1	0.000	0	0.858	92	0.000	0
0.4488	14.00	0.688	91	0.000	0	0.010	1	0.000	0	0.724	91	0.000	0
0.4654	13.50	0.597	91	0.000	0	0.008	1	0.000	0	0.624	91	0.000	0
0.4833	13.00	0.512	91	0.000	0	0.007	2	0.000	0	0.540	91	0.000	0
0.5027	12.50	0.451	91	0.000	0	0.005	2	0.000	0	0.477	91	0.000	0
0.5236	12.00	0.398	91	0.000	0	0.004	2	0.000	0	0.425	91	0.000	0
0.5712	11.00	0.303	91	0.000	0	0.002	3	0.000	0	0.341	91	0.000	0
0.5984	10.50	0.268	90	0.000	0	0.002	4	0.000	0	0.308	90	0.000	0
0.6283	10.00	0.236	90	0.000	0	0.001	4	0.000	0	0.278	90	0.000	0
0.6614	9.50	0.207	89	0.000	0	0.001	5	0.000	0	0.250	89	0.000	0
0.6981	9.00	0.181	89	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.224	89	0.000	0
0.7392	8.50	0.156	88	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.200	88	0.000	0
0.7854	8.00	0.134	86	0.000	0	0.013	-170	0.000	0	0.176	86	0.000	0
0.8378	7.50	0.113	85	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.153	85	0.000	0
0.8976	7.00	0.094	83	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.130	83	0.000	0
0.9666	6.50	0.075	80	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.106	80	0.000	0
1.0472	6.00	0.057	78	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.083	78	0.000	0
1.1424	5.50	0.041	76	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.060	76	0.000	0
1.2566	5.00	0.027	78	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.041	78	0.000	0
1.3963	4.50	0.016	84	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.025	84	0.000	0
1.5708	4.00	0.009	98	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.014	98	0.000	0
2.0944	3.00	0.001	155	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.002	154	0.000	0

+++CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS+++

For The Element I

ENCOUNTER				FX /		FY /		FZ /		MX /		MY /		MZ /	
Wave		Ampl.		Wave		Ampl.		Wave		Ampl.		Wave		Ampl.	
Frequency	Period	/-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/		/-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/		/-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/		/-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/		/-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/		/-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/			
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	16.35	-89	16.26	90	52.62	48	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	24.01	-89	23.88	90	47.72	46	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	36.41	-89	36.23	90	43.65	48	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2513	25.00	64.47	-89	64.14	90	42.95	57	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	173.33	-90	172.45	89	64.23	76	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3307	19.00	278.41	-91	277.00	88	93.85	81	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3491	18.00	904.42	-96	899.84	83	282.86	81	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0

0.3696	17.00	690.95	96	687.46	-83	204.45	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	248.27	93	247.01	-86	70.59	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	145.52	92	144.78	-87	40.42	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	120.82	92	120.21	-87	33.23	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	102.61	91	102.09	-88	28.01	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	88.67	91	88.23	-88	24.09	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	76.45	91	76.06	-88	20.83	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	67.46	91	67.12	-88	18.37	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	59.84	91	59.53	-88	16.34	-83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	46.85	91	46.61	-88	13.05	-85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	41.88	90	41.66	-89	11.76	-86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	37.37	90	37.18	-89	10.61	-87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	33.26	89	33.09	-90	9.55	-88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	29.47	89	29.32	-90	8.56	-89	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	25.93	88	25.80	-91	7.62	-90	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	22.59	86	22.48	-93	9.18	-124	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	19.40	85	19.30	-94	5.86	-94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	16.28	83	16.20	-96	4.97	-96	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	13.21	80	13.15	-99	4.07	-99	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	10.21	78	10.16	-101	3.18	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	7.37	76	7.34	-103	2.32	-103	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	4.91	78	4.89	-101	1.56	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	2.99	84	2.98	-95	0.95	-95	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	1.65	98	1.65	-81	0.53	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.20	155	0.20	-24	0.07	-25	0.00	0	0.00	0	0.00	0

```

*****
*                                     *
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     ----- July 16, 2017                       *
*                                     *                                     *
*      SPAR (3DDiff By MOSES)                                     *
*                                     *                                     *
*      * Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg.                  *
* * Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
* * Heading      = 0.00 Deg.   Forward Speed   = 0.00 Knots   Linearization Based on 1/ 20 *
*                                     *                                     *
*****

```

+++ CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element II

E N C O U N T E R		F X /		F Y /		F Z /		M X /		M Y /		M Z /	
----- Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	16.35	-89	16.26	-89	52.56	-47	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	24.01	-89	23.88	-89	47.64	-45	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	36.41	-89	36.23	-89	43.53	-47	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2513	25.00	64.47	-89	64.14	-89	42.73	-57	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	173.33	-90	172.45	-90	63.60	-77	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3307	19.00	278.41	-91	277.00	-91	92.90	-83	0.00	0	0.00	0	0.00	0

0.3491	18.00	904.42	-96	899.85	-96	280.18	-94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3696	17.00	690.95	96	687.45	96	202.77	94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	248.27	93	247.02	93	70.15	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	145.52	92	144.78	92	40.27	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	120.82	92	120.21	92	33.15	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	102.61	91	102.09	91	27.98	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	88.67	91	88.23	91	24.09	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	76.45	91	76.06	91	20.86	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	67.46	91	67.12	91	18.43	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	59.84	91	59.53	91	16.40	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	46.85	91	46.61	91	13.12	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	41.88	90	41.66	90	11.83	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	37.37	90	37.18	90	10.67	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	33.26	89	33.09	89	9.60	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	29.47	89	29.32	89	8.61	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	25.93	88	25.80	88	7.67	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	22.59	86	22.48	86	7.41	127	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	19.40	85	19.30	85	5.85	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	16.28	83	16.20	83	4.97	83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	13.21	80	13.15	80	4.08	80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	10.21	78	10.16	78	3.18	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	7.37	76	7.34	76	2.32	76	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	4.91	78	4.89	78	1.56	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	2.99	84	2.98	84	0.96	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	1.65	98	1.65	98	0.53	98	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.20	155	0.20	155	0.07	154	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	2.33	98	2.33	98	0.75	98	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.28	155	0.28	155	0.09	154	0.00	0	0.00	0	0.00	0

```

*****
*                                     *
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     ----- July 16, 2017                       *
*                                     *                                     *
*      SPAR (3DDiff By MOSES)                                     *
*                                     *                                     *
*      * Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg.                  *
*      * Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
*      * Heading      = 0.00 Deg.    Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization Based on 1/ 20 *
*                                     *                                     *
*****

```

+++ CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element III

ENCOUNTER		FX /		FY /		FZ /		MX /		MY /		MZ /	
Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	16.35	-89	16.26	90	52.56	-47	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	24.01	-89	23.88	90	47.64	-45	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	36.41	-89	36.23	90	43.53	-47	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2513	25.00	64.47	-89	64.14	90	42.73	-57	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	173.33	-90	172.45	89	63.60	-77	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3307	19.00	278.41	-91	277.00	88	92.90	-83	0.00	0	0.00	0	0.00	0

0.3491	18.00	904.42	-96	899.84	83	280.17	-94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3696	17.00	690.95	96	687.46	-83	202.77	94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	248.27	93	247.01	-86	70.15	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	145.52	92	144.78	-87	40.27	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	120.82	92	120.21	-87	33.15	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	102.61	91	102.09	-88	27.98	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	88.67	91	88.23	-88	24.09	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	76.45	91	76.06	-88	20.86	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	67.46	91	67.12	-88	18.43	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	59.84	91	59.53	-88	16.40	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	46.85	91	46.61	-88	13.12	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	41.88	90	41.66	-89	11.83	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	37.37	90	37.18	-89	10.67	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	33.26	89	33.09	-90	9.60	88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	29.47	89	29.32	-90	8.61	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	25.93	88	25.80	-91	7.67	87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	22.59	86	22.48	-93	7.41	127	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	19.40	85	19.30	-94	5.85	85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	16.28	83	16.20	-96	4.97	83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	13.21	80	13.15	-99	4.08	80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	10.21	78	10.16	-101	3.18	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	7.37	76	7.34	-103	2.32	76	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	4.91	78	4.89	-101	1.56	78	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	2.99	84	2.98	-95	0.96	84	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	1.65	98	1.65	-81	0.53	98	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.20	155	0.20	-24	0.07	154	0.00	0	0.00	0	0.00	0


```

*****
*                                     *
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     ----- July 16, 2017                       *
*                                     *                                     *
*      SPAR (3DDiff By MOSES)                                     *
*                                     *                                     *
*      * Draft      = 135.0 Meters   Trim Angle   = 0.00 Deg.                  *
*      * Roll Gy. Radius = 61.5 Meters   Pitch Gy. Radius = 61.5 Meters   Yaw Gy. Radius = 30.0 Meters *
*      * Heading      = 0.00 Deg.    Forward Speed = 0.00 Knots   Linearization Based on 1/ 20 *
*                                     *                                     *
*****

```

+++ CONNECTOR FORCE RESPONSE OPERATORS +++

=====

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

For The Element IV

E N C O U N T E R		F X /		F Y /		F Z /		M X /		M Y /		M Z /	
----- Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.1571	40.00	16.35	-89	16.26	-89	52.62	48	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.1795	35.00	24.01	-89	23.88	-89	47.72	46	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2094	30.00	36.41	-89	36.23	-89	43.65	48	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.2513	25.00	64.47	-89	64.14	-89	42.95	57	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3142	20.00	173.33	-90	172.45	-90	64.23	76	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3307	19.00	278.41	-91	277.00	-91	93.85	81	0.00	0	0.00	0	0.00	0

0.3491	18.00	904.42	-96	899.85	-96	282.87	81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3696	17.00	690.95	96	687.45	96	204.45	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.3927	16.00	248.27	93	247.02	93	70.59	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4189	15.00	145.52	92	144.78	92	40.42	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4333	14.50	120.82	92	120.21	92	33.23	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4488	14.00	102.61	91	102.09	91	28.01	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4654	13.50	88.67	91	88.23	91	24.09	-80	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.4833	13.00	76.45	91	76.06	91	20.83	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5027	12.50	67.46	91	67.12	91	18.37	-82	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5236	12.00	59.84	91	59.53	91	16.34	-83	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5712	11.00	46.85	91	46.61	91	13.05	-85	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.5984	10.50	41.88	90	41.66	90	11.76	-86	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6283	10.00	37.37	90	37.18	90	10.61	-87	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6614	9.50	33.26	89	33.09	89	9.55	-88	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.6981	9.00	29.47	89	29.32	89	8.56	-89	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7392	8.50	25.93	88	25.80	88	7.62	-90	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.7854	8.00	22.59	86	22.48	86	9.18	-124	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8378	7.50	19.40	85	19.30	85	5.86	-94	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.8976	7.00	16.28	83	16.20	83	4.97	-96	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.9666	6.50	13.21	80	13.15	80	4.07	-99	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.0472	6.00	10.21	78	10.16	78	3.18	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.1424	5.50	7.37	76	7.34	76	2.32	-103	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.2566	5.00	4.91	78	4.89	78	1.56	-101	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.3963	4.50	2.99	84	2.98	84	0.95	-95	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.5708	4.00	1.65	98	1.65	98	0.53	-81	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2.0944	3.00	0.20	155	0.20	155	0.07	-25	0.00	0	0.00	0	0.00	0

BIODATA PENULIS



Irza Yanuar Ishaq, lahir di kota Jember pada tanggal 06 Januari 1995, merupakan anak terakhir dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Ajung 2 Kalisat, SMPN 1 Kalisat dan SMAN 2 Jember. Setelah lulus SMA pada tahun 2013, penulis diterima di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS) melalui jalur SNMPTN dan terdaftar dengan NRP 4313100032. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis aktif menjadi Staff Biro Kajian Strategis BEM FTK 14/15, Staff Kewirausahaan HIMATEKLA FTK ITS 14/15, Staff Pendidikan Lembaga Dakwah Jurusan Teknik Kelautan ITS 15/16, Ketua Divisi Teknis Oil Rig Club 15/16, Ketua Divisi Seminar Keprofesian HIMATEKLA ITS 15/16, Konseptor Floating Structure Competition OCEANO 5, dan Pengurus Lab. Hidrodinamika FTK ITS 16/17. Penulis juga aktif menjadi panitia kegiatan kampus. Pada tahun 2016, penulis berkesempatan melaksanakan kerja praktek di PT. Trisula Mega Jasa Divisi *Engineering* selama dua bulan untuk perencanaan pembangunan Dermaga Jailolo. Selama masa studi strata I yang ditempuh selama 4 tahun, penulis tertarik dalam bidang hidrodinamika lepas pantai sehingga dalam Tugas Akhir ini mengambil topik olah gerak dalam keadaan *free floating* dan tertambat Struktur SPAR yang dianalisa secara analitis, numerik dan juga eksperimen di Laboratorium Hidrodinamika ITS.

Email : irzaishaq@gmail.com